植物营养与肥料学报 2016, 22(6): 1449–1457
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16039
http://www.plantnutrifert.org

不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响

周丽平，杨俐苹*，白由路，卢艳丽，王 磊，倪 露
（中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与肥料重点实验室，北京 100081）

摘要:【目的】氨挥发是农田氮素损失的重要途径之一，氮肥类型或尿素氮肥缓释处理方式直接或间接影响作物吸收及土壤理化性质，进而影响氨挥发和氮素利用效率。通过不同缓释处理技术减低氨挥发和氮素降解释放速率来提高作物氮素吸收，对于提高作物氮素利用率具有重要意义。**【方法】**通过两年田间原位监测试验，以不施氮肥为对照 (CK)，设硝酸钙 (CN)、常规尿素 (CU)、树脂包膜尿素 (CRF)、控失尿素 (LCU)、凝胶尿素 (CLP)、脲甲醛 (UF) 7 个处理，研究不同氮肥缓释化处理对夏玉米土壤氨挥发损失量、玉米产量和氮素利用的影响。**【结果】**1) 氨挥发主要集中于施肥后一周以内，常规尿素氨挥发累积量占整个生育期氨挥发累计总量平均为 81.6%，凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素、脲甲醛氨挥发累积量占整个生育期氨挥发累计总量的比例介于 62.2%～82.2% 之间。2) 2014 年夏玉米田间氨挥发监测期内，常规尿素的氨挥发累计总量为 N 14.9 kg/hm^2，凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素、脲甲醛处理与常规尿素相比下降幅度介于 21.7%～64.6%。2015 年，常规尿素的氨挥发累计总量为 N 17.3 kg/hm^2，凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素、脲甲醛处理与常规尿素相比下降幅度介于 17.3%～57.2%。3) 化肥氮在常规尿素、树脂包膜尿素以及控失尿素处理中的贡献率较高，两年均达 60% 以上，其中常规尿素中化肥氮的贡献率平均高达 76.0%。而化肥氮在脲甲醛中的贡献率较低，平均仅为 37.6%。4) 与常规尿素相比，脲甲醛、凝胶尿素、控失尿素以及树脂包膜尿素的产量也有显著增加，两年平均产量增幅为 6.3%～18.8%。5) 不同氮肥的夏玉米氮肥利用率也有显著差异，其中脲甲醛为最高，平均高达 57.9%，其次为凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素、硝酸钙和常规尿素，分别为 42.4%、38.3%、38.3%、23.5% 和 20.8%。**【结论】**氮肥中的氨挥发主要集中于施肥后一周以内。与常规尿素相比，脲甲醛、控失尿素、树脂包膜尿素、凝胶尿素均能明显减少氨挥发损失、提高产量和氮肥利用率，以脲甲醛和凝胶尿素效果更显著，是高产、高效、低损失的肥料类型。

关键词: 夏玉米；缓释氮肥；氨挥发；产量；氮素利用
中图分类号: S143.1$^+$5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)06–1449–09

Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field

ZHOU Li-ping, YANG Li-ping*, BAI You-lu, LU Yan-li, WANG Lei, NI Lu
(*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China*)

Abstract:【Objectives】Slow-release processing technologies have been used in urea production to reduce ammonia volatilization and de-nitrification of nitrate in soil, so to improve crop N uptake and eventually improve nitrogen utilization. Here the ammonia volatilization characteristics of different control-released urea were compared to provide references for their practical application. **【Methods】**A *in-situ* field experiment was conducted in a sandy soil in two years in North China plain. The treatments included no nitrogen fertilization

收稿日期：2016–01–25　　**接受日期：**2016–03–08
基金项目：国家科技支撑计划（2014bac31b01）；中国工程院咨询项目（201306zd001）资助。
作者简介：周丽平（1991—），女，山东济宁人，硕士研究生，主要从事养分高效利用研究。E-mail：pinganjia619@126.com
* 通信作者 E-mail：yangliping@caas.cn

control (CK), calcium nitrate (CN), common urea (CU), polymer-coated urea (CRF), release-controlled urea (LCU), polymer gel urea (CLP) and urea formaldehyde (UF). The ammonia volatilization loss, maize yield and nitrogen utilization were determined during the summer maize growing seasons. 【**Results**】1) The ammonia volatilization mainly occurred in the first week after applied into soil, the cumulative ammonia volatilization accounted for 81.6% of the whole growing period for CU, and 62.2%–82.2% for CLP, LCU, CRF and UF. 2) In 2014, the cumulative ammonia volatilization in CU was N 14.9 kg/hm^2; those were significantly decreased by 21.7%–64.6% from CLP, LCU, CRF and UF. In 2015, that of the CU was N 17.3 kg/hm^2, the decreases were by 17.3%–57.2%. 3) The ammonia volatilization loss ratios of the CU, CRF and LCU were higher than 60.0% in the two monitoring years, and that of CU reached to 76.0% in average, while the ratio of the UF was 37.6%. 4) The yearly average yields of the UF, CLP, LCU and CRF were increased significantly by 6.3%–18.8%, compared with the CU. 5)The nitrogen use efficiency with UF was up to 57.9%, and those with CLP, LCU, CRF, CN and CU were 42.4%, 38.3%, 38.3%, 23.5% and 20.8%, respectively. 【**Conclusions**】The urea formaldehyde, polymer gel urea, lost-controlled urea and polymer-coated urea can significantly reduce the ammonia volatilization loss, improve the maize yield and nitrogen use efficiency. Among the tested control-released nitrogen fertilizers, urea formaldehyde and polymer gel urea perform better for the high-yield, high-efficiency and less N loss.

Key words: summer maize; slow-release nitrogen fertilizer; ammonia volatilization; yield; nitrogen utilization

氮素损失已成为我国农田生态系统中非点源污染的重要途径之一，也是我国氮肥利用率较低的重要原因[1]。研究表明，施入土壤中的氮素，有三种归宿：35% 被作物吸收；约 13% 在土壤剖面中以无机氮 (N_{min}) 形态或有机结合形态残留；52% 以各种形式发生损失，其中氨挥发损失的氮素占总损失量的 21%[2–3]。氨挥发势必会降低农田氮素利用效率，不利于农作物高产[4, 8]，同时，氨也是大气中重要的微量气体之一，影响大气中 PM2.5 的酸度，造成环境污染[9]。目前，全球每年大约有 9.3×10^6 mol NH_3 进入大气层[10]，并呈不断增加的趋势，农业生产引起的 NH_3 排放是大气 NH_3 的主要来源之一[11]。在农田生态系统中，导致氨挥发增加的原因之一是肥料的养分释放时间和强度与作物需求之间不吻合。通过改良肥料性质或加入肥料增效剂，控制养分释放，使养分释放时间和强度符合作物养分吸收规律，在一定程度上能够协调土壤养分供给和作物养分需求之间的关系，从而减少肥料损失以提高肥料利用率[12]。

氮肥类型主要有铵态氮肥、硝态氮肥以及酰胺态氮肥，其中，酰胺态氮肥尿素因具有含氮量高、物理性状较好和无副成分等优点，是我国主要的农用氮肥[13]。但是，它也具有易吸湿结块、易水解、释放快以及易发生田间损失等缺点[13]，因此，包膜尿素、控失尿素、脲甲醛、凝胶尿素等改良品种被广泛应用于生产。树脂包膜尿素是用有机高分子材料作为包膜材料，树脂具有“膜”的作用，可溶性物质必须通过该膜向周围环境扩散，另外，它能减少养分与土壤间的相互接触，从而能减少周围土壤的生物、化学和物理作用对养分的固定，因此，树脂可用于控制肥料养分的释放[14]。控失尿素是通过复合材料对尿素进行改性，将其中的养分固定在植物根际土壤中，形成分子网格吸附和固定营养元素，以满足植物整个生长发育过程中对养分的需求，减少污染、控制肥料流失[15–16]。脲甲醛是在尿素中加入一定比例不同链长的甲基脲聚合物，施入农田后快速融化为胶体被土壤紧密吸附融合，从而降低养分流失。脲甲醛缓释氮肥含有少量游离尿素、冷水不溶氮和热水不溶氮，具有速效和缓释相济的功能，可实现氮素速效和长效的完美结合，从而达到控释养分释放的目的[17, 20]。凝胶尿素是通过在尿素中添加一种交链丙烯酰胺-丙烯酸钾交聚物缓控载体制得，此材料亲水不溶于水，遇水膨胀成凝胶，通过化学吸附控释 NH_4^+，从而减少氨挥发，提高氮利用率[21]。研究表明包膜类肥料能显著提高玉米产量，有效降低土壤氨挥发速率和氨挥发累积量，包膜类肥料的氮肥利用率和农学效率也均显著高于常规尿素处理[22,25]。凝胶尿素因添加缓控载体，也可以减缓尿素的水解、铵化和硝化过程，进而控制养分释放，提高氮素利用效率[26–27]。在尿素中添加脲酶抑制剂可以减少氨挥发，且脲酶抑制剂与硝化抑制剂配合施用可更有效地提高氮肥的回收率[28]。但这些研究均集中于同类控释氮肥、化能缓释类氮肥或者传统氮肥的比

较，对于各大类缓释化处理氮肥对华北地区夏玉米田间氨挥发和氮素利用状况影响的系统研究与评估较少。

因此，本研究深入分析比较了五大类常见改性氮肥对华北地区夏玉米田间氨挥发及氮肥利用状况的影响，为推荐施肥提供科学依据和技术手段。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2014 年和 2015 年设在河北省廊坊市广阳区万庄镇北中国农业科学院国际农业高新技术示范园内 (N39°35′47.03″、E116°35′16.24″) 进行，该地区属于暖温带大陆性季风气候，年平均日照时数在 2660 h，年平均气温 11.9℃，无霜期平均 183 d，年平均降水量 554.9 mm。种植制度为玉米与小麦轮作。供试土壤的土壤类型为潮土，土壤质地为砂壤。0—20 cm 土层土壤有机质含量 7.4 g/kg、铵态氮 3.8 mg/kg、硝态氮 19.5 mg/kg、土壤全氮 0.23 g/kg、速效磷 21.0 mg/kg、速效钾 65.7 mg/kg、pH 值 8.2。

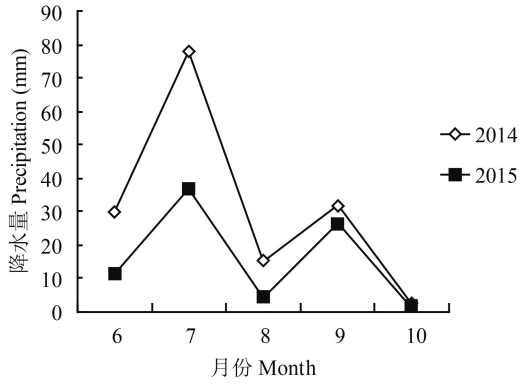

图 1　监测期间试验地的降水量

Fig. 1　Precipitation in the experimental field during the monitoring period

1.2　供试材料

供试肥料：供试氮肥包括常规尿素 (含 N 46%)、硝酸钙 (含 N 15.5%)、树脂包膜尿素 (含 N 43%)、脲甲醛 (含 N 41%)，由中国农业科学院国家测土配方施肥重点实验室提供)，控失尿素 (含N 44%，在常规尿素中添加控失因子制得，由心连心肥料有限公司提供)、凝胶尿素 (含 N 46%，以水：常规尿素：丙烯酰胺–丙烯酸钾交聚物 = 100：75：2 制得，为凝胶状态，其中丙烯酰胺–丙烯酸钾交聚物为一种保水剂材料[29–30]，由北京汉力淼新技术有限公司提供)，磷肥为过磷酸钙 (含 P_2O_5 12%)，钾肥为硫酸钾 (含 K_2O 51%)。

供试作物：夏玉米，品种为郑单 958，行距 60 cm，株距 21 cm。试验分别于 2014 年 6 月 24 日到 10 月 14 日以及 2015 年 6 月 19 日到 10 月 19 日进行。

1.3　试验设计

采用单因素设计，设 7 个处理：1) 不施氮对照 (CK)；2) 硝酸钙 (CN)；3) 常规尿素 (CU)；4) 树脂包膜尿素 (CRF)；5) 控失尿素 (LCU)；6) 凝胶尿素 (CLP)；7) 脲甲醛 (UF)。每个处理 3 次重复，小区面积 24 m^2 (3 m × 8 m)，共 21 个小区，随机区组排列。氮肥、磷肥、钾肥用量分别为 180 kg/hm^2、90 kg/hm^2、90 kg/hm^2，均为一次性条施，施肥深度为 10～12 cm，其他田间管理按照常规方式进行。

1.4　样品采集与分析

1.4.1　氨气的捕获方法　氨挥发测定方法为通气法[31–32]，该装置由聚氯乙烯硬质塑料管制成，内径为 15 cm，高为 10 cm (图 2)，测定过程中分别将两块厚度均为 2 cm，直径为 16 cm 的海绵均匀浸以 15 mL 的磷酸甘油溶液 (50 mL 磷酸＋40 mL 丙三醇，定容至 1000 mL) 后，置于硬质塑料管中，下层的海绵距管底 5 cm，其中下层 1 cm 塑料管埋入土壤中，上层海绵与管顶部相平。为防止降雨对测定装置的影响，在各装置顶部 30 cm 处支起一半径大于收集装置半径的顶盖。

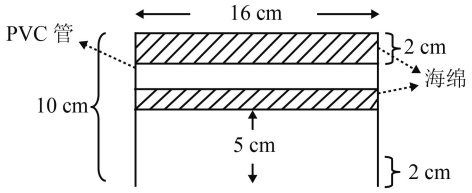

图 2　氨挥发收集装置

Fig. 2　Apparatus for ammonia collection

土壤挥发氨的捕获在施肥后的当天开始，于各小区的不同位置，分别放置 3 个通气法氨捕获装置，第二天早晨 7:00 取样。取样时，将通气装置下层海绵取出，迅速编号后分别装入自封袋中，密封，同时换上另一块刚刚浸过磷酸甘油的海绵。变动摆放位置以后，将装置重新放好，以备下一次田间吸收。上层的海绵视其干湿情况 3～7 d 更换 1 次。把取下的下层海绵带回试验室后，分别装入 500 mL 的塑料瓶中，加 300 mL 1.0 mol/L 的 KCl 溶液，使海绵完全浸于其中，振荡 1 h 后，采用连续流动分析仪 (Seal AA3) 测定浸取液中的铵态氮。开始的 1 周，每天取样 1 次；第 2～3 周，根据测到的挥发氨

数量多少，每 1～3 d 取样 1 次，以后取样间隔可延长到 7 d，直至监测不到氨挥发。

土壤氨挥发速率的计算公式为：

NH_3-N [kg/(hm^2·d)] = [M/(A × D)] × 10^{-2}

其中， M 为通气法单个装置平均每次测得的氨量 (NH_3-N，mg)；A 为捕获装置的横截面积 (m^2)；D 为每次连续捕获的时间 (d)。

1.4.2 产量的测定及植株样品的采集 在玉米成熟期，全部收获，进行实打实收计产。每个小区选择 3 株有代表性的玉米植株，装入网袋带回实验室，分为秸秆和籽粒，烘干后全部粉碎，采用 H_2SO_4–H_2O_2 消煮提取，用连续流动分析仪 (Seal AA3) 测定全氮含量。

1.5 数据处理

每日氨挥发通量计算公式：

NH_3-N (kg/hm^2) = (M/A) × 10^{-2}

其中, M 为通气法单个装置平均每日测得的氨量 (NH_3-N，mg)；A 为捕获装置的横截面积 (m^2)。

氨挥发累积量 = 测定时期内每日氨挥发通量之和

氨挥发累积量中化肥的贡献率 = (施肥处理氨挥发量 – 不施肥对照氨挥发量)/施肥处理氨挥发量 × 100%

氨挥发累积量占施肥量的比例 = (施肥处理氨挥发量–不施肥对照氨挥发量)/施氮量 × 100%

吸氮量 (g/hm^2) = 氮含量 × 干重

氮收获指数 (NHI) = 籽粒吸氮量/植株吸氮量 × 100%

氮肥农学利用效率 (NAE, kg/kg) = (施氮区产量 – 不施氮区产量)/施氮量

氮肥利用率 (NFUE) = (施氮区地上部分吸氮量 – 不施氮区地上部分吸氮量)/施氮量 × 100%

试验数据采用 Excel 2003 软件对数据进行处理和作图，采用 SAS9.1 统计软件 Duncan 方法进行方差分析。

2 结果与讨论

2.1 不同氮肥的田间氨挥发监测

2.1.1 不同氮肥的田间氨挥发速率动态特征 2014 年及 2015 年氨挥发监测期间，在施基肥后整体上各处理的氨挥发速率表现为先增加后降低的趋势，凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素、常规尿素均在施肥后第 2～3 天达到峰值 (图 3)。常规尿素氨挥发速率峰值在两年内均为最大，分别为 N 4.3 和 4.6 kg/(hm^2·d)。2014 年凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素氨挥发速率峰值分别为 N 3.3、3.1、2.3 kg/(hm^2·d)；2015 年凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素氨挥发速率峰值分别为 N 3.5、2.9、2.5 kg/(hm^2·d)，常规尿素与其他 3 个处理之间差异性显著。出现峰值以后，常规尿素、凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素的氨挥发速率开始降低，2014 年因降水影响，在施肥后第 5 天，4 个处理的氨挥发速率又有一定幅度升高之后，氨挥发速率处于缓慢降低的状态。脲甲醛在施肥后第 6、7 天达到氨挥发速率峰值，但仅为 N 0.9 和 1.0 kg/(hm^2·d)。硝酸钙作为非铵态类肥料，氨挥发速率一直较低，与空白对照无差异。

2.1.2 不同氮肥的田间氨挥发累积量 在监测期间，各施肥处理的氨挥发累积量与氨挥发速率变化趋势一致 (图 4)。两年数据表明，监测开始一周内，常规尿素氨挥发累积量分别占整个生育期氨挥发累计总

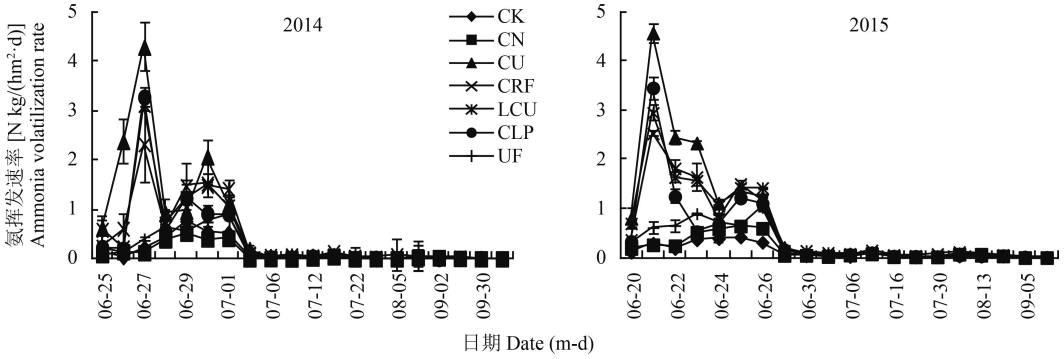

图 3 不同氮肥的氨挥发速率

Fig. 3 Ammonia volatilization of different nitrogen fertilizers

[注（Note）: CK—不施氮对照 No N fertilizer; CN—硝酸钙 $Ca(NO_3)_2$; CU—尿素 Urea; CRF—树脂包膜尿素 Polymer-coated urea; LCU—控失尿素 Release-controlled urea; CLP—凝胶尿素 Polymer gel urea; UF—脲甲醛 Urea formaldehyde.]

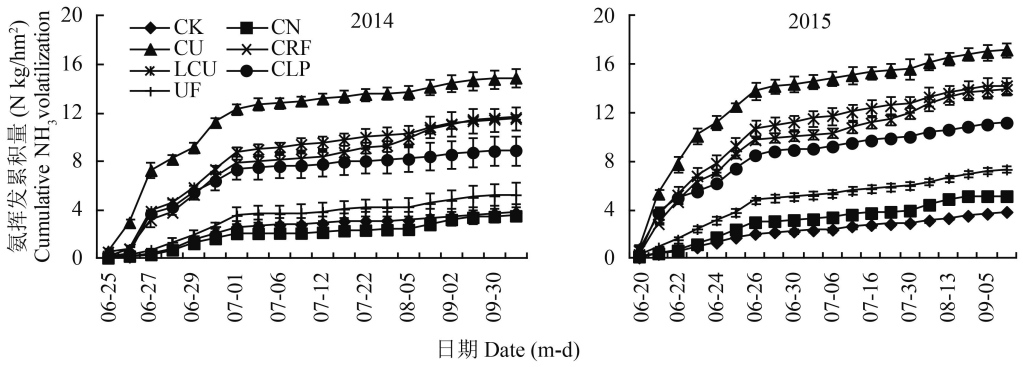

图 4　不同氮肥的氨挥发累积量

Fig. 4　Cumulative NH_3 volatilization of different nitrogen fertilizers

[注 (Note): CK—不施氮对照 No N fertilizer; CN—硝酸钙 $Ca(NO_3)_2$; CU—尿素 Urea; CRF—树脂包膜尿素 Polymer-coated urea; LCU—控失尿素 Release-controlled urea; CLP—凝胶尿素 Polymer gel urea; UF—脲甲醛 Urea formaldehyde.]

量的 82.9% 和 80.2%，凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素、脲甲醛氨挥发累积量占整个生育期氨挥发累计总量的比例介于 62.2%～82.2% 之间。2014 年夏玉米田间氨挥发监测期内，常规尿素的氨挥发累计总量为 N 14.9 kg/hm²，凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素、脲甲醛处理与常规尿素相比分别降低了 40.0%、22.6%、21.7% 和 64.6%。2015 年，常规尿素的氨挥发累计总量为 N 17.3 kg/hm²，凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素、脲甲醛处理与常规尿素相比分别降低了 35.3%、17.3%、19.1% 和 57.2% (表 1)。2014 年，在各处理中，常规尿素氨挥发的化肥贡献率为最高，为 74.5%，脲甲醛为最低仅为 27.9%，树脂包膜尿素以及控失尿素氨挥发的化肥贡献率介于常规尿素和凝胶尿素之间，且树脂包膜尿素和控失尿素之间差异性不显著，但与凝胶尿素之间差异性显著。

2.2　不同氮肥对夏玉米产量和氮素利用的影响

从表 2 可以看出，不同氮肥处理对夏玉米产量影响各异。与不施肥处理相比，脲甲醛、凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素以及常规尿素的产量均有显著增加，平均产量增幅为 10.3%～31.0%。与常规尿素相比，脲甲醛、凝胶尿素、控失尿素以及树脂包膜尿素的产量也有显著增加，平均产量增幅为 6.3%～18.8%。且在各处理中，脲甲醛的增产幅度最大，后依次为凝胶尿素、控失尿素和树脂包膜尿素。不同氮肥品种对夏玉米收获指数的影响相对较小，收获指数介于 58.2%～62.0% 之间，脲甲醛的平均收获指数在各处理中最大。

表 1　不同氮肥氨挥发累积量及其所占施氮量的比例

Table 1　Cumulative ammonia volatilization from fertilizers and ratio in applied N

处理 Treatment	累积氨挥发量 (kg/hm²) Accumulative NH_3 volatilization		占比 (%) Rate		化肥贡献率 (%) Loss from fertilizer	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015
CK	3.8 ± 0.7 e	3.9 ± 0.1 f				
CN	3.6 ± 0.2 e	5.2 ± 0.2 e	0.0	0.7	0.0	0.7
CU	14.9 ± 0.7 a	17.3 ± 0.1 a	6.2	7.4	74.5	77.5
CRF	11.7 ± 0.2 b	14.0 ± 0.5 b	4.4	5.6	67.4	72.1
LCU	11.6 ± 1.0 b	14.3 ± 0.2 b	4.3	5.8	67.0	72.7
CLP	9.0 ± 1.2 c	11.2 ± 0.1 c	2.9	4.1	57.4	65.2
UF	5.3 ± 1.0 d	7.4 ± 0.3 d	0.8	1.9	27.9	47.3

注（Note）: CK—不施氮对照 No N fertilizer; CN—硝酸钙 $Ca(NO_3)_2$；CU—常规尿素 Common urea; CRF—树脂包膜尿素 Polymer-coated urea; LCU—控失尿素 Release-controlled urea; CLP—凝胶尿素 Polymer gel urea; UF—脲甲醛 Urea formaldehyde；同列数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column mean significant different at the 5% level.

表 2 不同氮肥处理夏玉米的产量、氮收获指数及增产率

Table 2 Yield, harvest index and yield increase rate of summer maize under different nitrogen treatments

处理 Treatment	2014		2015		平均 Mean		增产率 (%) Yield increase	
	产量 (t/hm^2) Yield	收获指数 (%) NHI	产量 (t/hm^2) Yield	收获指数 (%) NHI	产量 (t/hm^2) Yield	收获指数 (%) NHI		
CK	8.6 d	55.2 ab	8.8 f	62.0 d	8.7	58.6		
CN	10.4 bc	57.8 ab	10.0 d	62.3 cd	10.2	60.1	17.2	6.3
CU	9.6 c	59.0 a	9.5 e	64.0 abc	9.6	61.5	10.3	0.0
CRF	10.7 ab	56.8 ab	11.0 bc	64.1 abc	10.9	60.5	25.3	13.5
LCU	10.9 ab	53.3 b	10.8 c	63.1 bcd	10.9	58.2	25.3	13.5
CLP	11.1 ab	59.5 a	11.2 ab	64.4 ab	11.2	62.0	28.7	16.7
UF	11.2 a	58.0 ab	11.5 a	65.1 a	11.4	61.6	31.0	18.8

注（Note）: CK—不施氮对照 No N fertilizer; CN—硝酸钙 $Ca(NO_3)_2$; CU—常规尿素 Common urea; CRF—树脂包膜尿素 Polymer-coated urea; LCU—控失尿素 Release-controlled urea; CLP—凝胶尿素 Polymer gel urea; UF—脲甲醛 Urea formaldehyde；同列数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column mean significant different at the 5% level.

不同氮肥处理下，夏玉米的生物量、籽粒吸氮量各异 (表 3)，其中，脲甲醛的生物量为最高，两年平均为 22.9 t/hm^2，并与其他处理之间呈显著性差异，其次为控失尿素、树脂包膜尿素、凝胶尿素、硝酸钙、常规尿素。脲甲醛的籽粒吸氮量平均高达 151.2 kg/hm^2，在各处理中最高，其次为凝胶尿素、树脂包膜尿素、控失尿素、硝酸钙、常规尿素，分别为 138.1、131.1、125.9、116.5、111.0 kg/hm^2。

夏玉米氮肥农学效率是单位施肥量对作物籽粒产量增加的反映，是农业生产中最重要的经济指标之一。脲甲醛的氮肥农学利用效率为最高，平均高达 14.7 kg/kg。常规尿素作为普通肥料对照，其氮素农学利用效率为最低，仅为 4.8 kg/kg (如表 4)。凝胶尿素、树脂包膜尿素、控失尿素的氮素农学利用效率差异性不显著，这说明夏玉米对脲甲醛的利用效果最好。与常规尿素相比，脲甲醛、凝胶尿素、控失尿素和树脂包膜尿素氮肥利用率的也有显著提高，仅有非铵态类肥料硝酸钙与常规尿素之间无差异。在各处理中，脲甲醛的氮肥利用率为最高，高达 54.9%，其次是凝胶尿素，为 42.4%。

3 讨论与结论

3.1 不同氮肥对氨挥发的影响

氨挥发是氮肥施入土壤后造成氮素气态损失的

表 3 不同氮肥处理夏玉米生物量和籽粒吸氮量

Table 3 Biomass and grain N uptake of summer maize under different nitrogen treatment

处理 Treatment	2014		2015		平均 Mean	
	生物量 (t/hm^2) Biomass	吸氮量 (kg/hm^2) N uptake	生物量 (t/hm^2) Biomass	吸氮量 (kg/hm^2) N uptake	生物量 (t/hm^2) Biomass	吸氮量 (kg/hm^2) N uptake
CK	16.2 d	81.9 d	20.8 e	102.7 f	18.5	92.3
CN	18.2 bc	100.1 cd	23.3 cd	132.9 d	20.8	116.5
CU	17.3 ab	95.3 cd	23.0 d	126.6 e	20.2	111.0
CRF	18.8 ab	107.0 bc	24.7 b	155.1 b	21.8	131.1
LCU	19.6 ab	108.2 bc	24.3 b	143.5 c	22.0	125.9
CLP	19.2 ab	125.6 ab	23.7 c	150.5 b	21.5	138.1
UF	20.2 a	133.4 a	25.6 a	169.0 a	22.9	151.2

注（Note）: CK—不施氮对照 No N fertilizer; CN—硝酸钙 $Ca(NO_3)_2$; CU—常规尿素 Common urea; CRF—树脂包膜尿素 Polymer-coated urea; LCU—控失尿素 Release-controlled urea; CLP—凝胶尿素 Polymer gel urea; UF—脲甲醛 Urea formaldehyde；同列数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Valuse followed by different letters in a column mean significant different at the 5% level.

表 4　不同氮肥处理下夏玉米的氮素农学利用效率及氮肥利用率

Table 4　N Agronomy efficiency and N fertilizer use efficiency of summer maize under different nitrogen treatment

处理 Treatment	2014		2015		平均 Mean	
	农学利用效率 NAE (kg/kg)	氮肥利用率 NFUE (%)	农学利用效率 NAE (kg/kg)	氮肥利用率 NFUE (%)	农学利用效率 NAE (kg/kg)	氮肥利用率 NFUE (%)
CN	9.8 bc	23.5 d	6.5 d	23.5 d	8.2	23.5
CU	5.6 c	20.6 d	4.0 e	21.0 d	4.8	20.8
CRF	11.7 ab	34.2 c	12.5 bc	42.4 b	12.1	38.3
LCU	12.6 ab	42.1 bc	11.0 c	34.4 c	11.8	38.3
CLP	12.7 ab	46.9 b	13.2 ab	37.9 bc	13	42.4
UF	14.5 a	57.4 a	14.8 a	52.4 a	14.7	54.9

注（Note）: CN—硝酸钙 $Ca(NO_3)_2$; CU—常规尿素 Common urea; CRF—树脂包膜尿素 Polymer-coated urea; LCU—控失尿素 Release-controlled urea; CLP—凝胶尿素 Polymer gel urea; UF—脲甲醛 Urea formaldehyde. 同列不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters in a column mean significant different at the 5% level.

重要途径，主要受土壤条件、环境因子及施肥状况等因素的影响。在本试验中，施肥量和田间条件是一致的，因而氨挥发主要受肥料类型的影响。在本研究中，土壤氨挥发峰值多出现在灌溉施肥后 1～3 天，之后迅速下降进入低挥发阶段，这与董文旭等[33]的研究结果一致。另外，两年结果显示表明，各处理的氨挥发累积量平均表现为常规尿素 > 树脂包膜尿素 > 控失尿素 > 凝胶尿素 > 脲甲醛 > 对照 > 硝酸钙。且脲甲醛、控失尿素、树脂包膜尿素、凝胶尿素与常规尿素相比，均能显著减少氨挥发，尤其是脲甲醛，降低氨挥发的幅度最大，这是因为脲甲醛缓释肥料是不同链长的甲基脲聚合物，具有不同的水溶性氮含量，施入土壤后，靠土壤微生物分解释放氮素，可便于作物在不同时期的吸收利用，另外，缓溶性物质阻隔肥料与土壤脲酶的直接接触及减少尿素态氮的溶出，从而达到降低和延缓土壤氨挥发的效果。树脂包膜尿素，是在肥料颗粒表面包裹一层控释膜，利用膜层将高浓度速效养分与土壤分割开来，膜层具有的空隙结构可以控制养分按一定的速率释放，与此同时，也可以阻隔尿素态氮与土壤中酶的直接接触，从而减少土壤氨挥发。凝胶尿素和控失尿素中添加的材料为网状结构，可以减缓尿素氨化，这是其氨挥发较低的重要原因[34, 39]，由此可以推测，脲甲醛、树脂包膜尿素减少氨挥发是因为缓释材料阻隔了尿素态氮与土壤脲酶的直接接触，而土壤脲酶是氨挥发的重要影响因素，所以可以减少氨挥发。凝胶尿素和控失尿素中添加的网状材料，可以减缓尿素在土壤中的转化过程，进而使养分更多的供给作物吸收利用，在延缓尿素氨化、水解等过程的同时，减少氨挥发。

3.2　不同氮肥对产量和氮素利用的影响

脲甲醛、控失尿素、树脂包膜尿素、凝胶尿素与常规尿素相比均能提高产量，且差异性显著。其中脲甲醛的增产效果最为明显，比常规尿素平均增产 18.8%，其次为凝胶尿素、控失尿素、树脂包膜尿素，分别比常规尿素平均增产 16.7%、13.5% 和 13.5%，且脲甲醛的氮肥利用率也较高，高达 54.9%，而我国的氮肥利用率平均为 30%～35%，其显著高于我国氮肥利用率的平均水平[40-41]。这与脲甲醛和凝胶尿素的控释机理有关，脲甲醛肥料施入土地后，快速融化为胶体被土壤紧密吸附融合，从而保证养分不流失。脲甲醛的生物有效性取决于土壤微生物作用，在土壤微生物的作用下逐步分解并释放氮。在整个生长季节脲甲醛可以为土壤微生物提供碳源和氮源，持续平稳地向土壤释放氮营养[37, 39]。另外，本研究采用的凝胶尿素添加了一种交链丙烯酰胺–丙烯酸钾交聚物缓控载体，该缓控载体不是肥，它属阴离子型，所以能控制阳离子释放。从农业经济角度，它能吸附尿素，因为是非电解质肥，可通过 CLP 网状结构减缓尿素的水解、铵化和硝化过程提高夏玉米产量和氮肥利用率[18–19]。可见，脲甲醛和凝胶尿素在减少氨挥发、提高氮肥利用方面较其他处理效果更好。

参考文献:

[1] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992. 171–185
Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in Chinese Soils[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 171–185.

[2] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493–1499.
Ju X T, Liu X J, Zou G Y, *et al*. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1493–1499.

[3] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 19(2): 259–273.
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition Fertilizer Science, 2012, 19(2): 259–273.

[4] Mosier A R, Syers K J, Freney J R. Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impact of fertilizer use on food production and the environment [M]. Island: Island Press, 2004. 53–69.

[5] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, *et al*. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands [J]. Science, 2004, 303(5665): 1876–1879.

[6] Emmett B A. Nitrogen saturation of terrestrial ecosystems: some recent findings and their implications for our conceptual framework [J]. Water Air Soil Pollution Focus, 2007, 7(1): 99–109.

[7] 赵允格, 邵明安, 张兴昌. 成垄压实施肥对氮素运移及氮肥利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 68–72.
Zhao Y G, Shao M A, Zhang X C. Impact of localized compaction and ridge fertilization on field nitrate transport and nitrate use efficiency [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(1): 68–72.

[8] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降[J]. 应用生态学报, 2004, 14(11): 1884–1888.
Su C G, Yin B, Zhu Z L, *et al*. Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 14(11): 1884–1888.

[9] Fangmeier A, Hadwiger-Fangmeier A, Van der Eerden L, *et al*. Effects of atmospheric ammonia on vegetation-a review [J]. Environmental Pollution, 1994, 86(1): 43–82.

[10] Ni J Q, Heber A J. Sampling and measurement of ammonia concentration at animal facilities-A review[A]. ASAE Meeting Presentation, Sacramento, CA, USA, 2001.

[11] 王玮, 汤大钢, 刘红杰. 中国PM2.5污染状况和污染特征的研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(1): 1–5.
Wang W, Tang D G, Liu H J. Research on current pollution status and pollution characteristics of PM2.5 in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(1): 1–5.

[12] 吴进. 不同氮肥品种对农田氨挥发及冬小麦产量的影响[D]. 北京：中国农业科学院硕士学位论文, 2009.
Wu. Effects of different nitrogen sources on farmland ammonia volatilization and Winter Wheat Yield[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.

[13] 胡霭堂, 周立祥. 植物营养学(下册)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 13–27
Hu A T, Zhou L X. Plant Nutrition (2) [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. 13–27

[14] Shaviv A, Mikkelsen R L. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation-A review [J]. Fertilizer Research, 1993, 35(1–2): 1–12.

[15] 王国文, 郭景丽, 姜瑛, 等. 施用控失尿素对土壤养分含量及水稻产量的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(10): 73–75.
Wang G W, Guo J L, Jiang Y, *et al*. Effects of loss-control urea application on soil nutrient content and rice yield[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(10): 73–75.

[16] 孙克刚, 郭跃升, 李玉顺, 等. 控失尿素在夏玉米上的应用效果研究[J]. 磷肥与复肥, 2015, 30(1): 51–52.
Sun K G, Guo Y S, Li Y S, *et al*. Application effect of controlled release urea on summer maize[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2015, 30(1): 51–52.

[17] 黄丽娜, 魏守兴. 脲甲醛肥料合成及应用研究现状[J]. 农学学报, 2015, 5(7): 76–80.
Huang L N, Wei S X. The status research on synthesis and application of urea formaldhyde fertilizer[J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(7): 76–80.

[18] 许秀成, 李药萍, 王好斌. 脲甲醛肥料在我国发展的可行性[J]. 磷肥与复肥, 2009, (6): 5–7.
Xu X C, Li D P, Wang H B. The feasibility of development for urea-formaldehyde fertilizer in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2009 (6): 5–7.

[19] Greidinger D S, Cohen L. Fertilizer compound of the urea form type and a method for the production thereof [P]. U.S. Patent: 4,089,899, 1978–5-16.

[20] 张文辉, 丁巍巍, 张勇, 等. 脲甲醛缓释肥料的研究进展[J]. 化工进展, 2011, (S1): 437–441.
Zhang W H, Ding W W, Zhang Y, *et al*. Research advanced on urea-formaldehyde slow-release fertilizer[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011 (S1): 437–441.

[21] 严瑞瑄. 水溶性高分子[M]. 北京：化学工业出版社, 1998. 143–144, 217–221.
Yan R X. Water-soluble Copolymer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998. 143–144, 217–221.

[22] 孙克君, 毛小云, 卢其明, 等. 几种控释氮肥减少氨挥发的效果及影响因素研究[J]. 应用生态学报, 2005, 15(12): 2347–2350.
Sun K J, Mao X Y, Wang K J, *et al*. Mitigation effect of several controlled-release N fertilizers on ammonia volatilization and related affecting factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 15(12): 2347–2350.

[23] 赵斌, 董树亭, 王空军, 等. 控释肥对夏玉米产量及田间氨挥发和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2678–2684.
Zhao B, Dong S T, Wang K J, *et al*. Effects of controlled release fertilizers on summer maize grain yield, field ammonia volatilization, and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(11): 2678–2684.

[24] 卢艳艳, 宋付朋, 赵杰, 等. 控释尿素对土壤氨挥发和无机氮含量及玉米氮素利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 79–82.
Lu Y Y, Song F P, Zhao J, *et al*. Effects of controlled-release urea on ammonia volatilization and inorganic nitrogen of soil and nitrogen

use efficiency in maize [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 79–82.

[25] 卢艳艳, 宋付朋. 不同包膜控释尿素对农田土壤氨挥发的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7133–7140.
Lu Y Y, Song F P. Effects of different coated controlled-release urea on soil ammonia volatilization in farmland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7133–7140.

[26] Mikkelsen R L. Using hydrophilic polymers to control nutrient release [J]. Fertilizer Research, 1994, 38(1): 53–59.

[27] Mikkelsen R L, Behel Jr A D. Williams H M. Addition of gel-forming hydrophilic polymers to nitrogen fertilizer solutions [J]. Fertilizer research, 1993, 36(1): 55–61.

[28] 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.
Zhang W X, Sun G, He P, *et al*. Effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization from paddy fields[J]. Plant Nutrition Fertilizer Science, 2013, 19(6): 1411–1419.

[29] Abraham J, Pillai V N R. N, N' - methylene bisacrylamide - crosslinked poly - acrylamide for controlled release urea fertilizer formulations [J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 1995, 26(19–20): 3231–3241.

[30] Mikkelsen R L. Using hydrophilic polymers to control nutrient release[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1993, 38(1): 53–59.

[31] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠. 田间土壤氨挥发的原位测定一通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205–209.
Wang Z H, Liu X J, Ju X T. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method [J]. Plant Nutrition Fertilizer Science, 2002, 8(2): 205–209.

[32] Wang Z H, Liu X J, Ju X T, *et al*. Ammonia volatilization loss from surface-broadcast urea: comparison of vented- and closed-chamber methods and loss in winter wheat-summer maize rotation in North China Plain [J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2004, 35(19): 2917–2939.

[33] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 华北农田土壤氨挥发原位测定研究[J]. 中国生态农业学报, 2006.
Dong W X, Hu C S, Zhang Y M. In situ determination of ammonia volatilization in field of North China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006.

[34] 刘兵. 脲甲醛缓控释肥料在大田作物上应用效应及产业化发展途径研究[D]. 扬州: 扬州大学硕士学位论文, 2006.
Liu B. Effect of slow-control-released fertilizer urea-formaldehyde on the field-crops and further industrial approach[D]. Yangzhou: MS Thesis of Yangzhou University, 2006.

[35] 谷佳林, 边秀举, 徐凯, 等. 不同缓控释肥对高羊茅草坪生长及氮素挥发的影响[J]. 草业学报, 2013, 2(22): 235–242.
Gu J L, Bian X J, Xu K, et al. Effects of different slow/controlled release nitrogen fertilizer on tall fescues turf growth and nitrogen volatilization [J]. Acta Pratacuhurae Sinica, 2013, 2(22): 235–242.

[36] 余立祥, 卞坡, 吴跃进, 等. 化肥"控失"对作物氮素农学利用率的影响[J]. 安徽农学通报, 2008, 13(24): 25–26.
Yu L X, Bian P, Wu Y J, *et al*. Influence of "Lose-control" of fertilizer on nitrogen agronomic utilized efficiency of crop [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2008, 13(24): 25–26.

[37] 李雨繁, 王成志, 冯国忠, 等. 高氮复混合肥在不同类型土壤上的氨挥发特性和氮素转化[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 215–220.
Li Y F, Wang C Z, Feng G Z, *et al*. Ammonia volatilization characteristics and nitrogen transformation of different kinds of high-nitrogen compound fertilizer on different soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 215–220.

[38] 吕云峰. 脲甲醛缓释肥料[J]. 磷肥与复肥, 2009, 24(6): 8–10.
Lv Y F, Urea-formaldehyde slow release fertilizers[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2009, 24(6): 8–10.

[39] 刘宁, 孙振涛, 韩晓日, 等. 缓/控释肥料的研究进展及存在问题[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 1005–1009.
Liu N, Sun Z T, Han X R, *et al*. Research progress and existing problems on slow/controlled release fertilizers [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(4): 1005–1009.

[40] 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.

[41] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1998. 38–48.
Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer problems in China's agricultural sustainable development [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1998. 38–48.