

控释与稳定尿素配施对土壤氮素迁移及冬小麦-夏玉米产量的影响

肖强, 李鸿雁, 衣文平, 邹国元, 魏丹, 孙世友, 李丽霞

引用本文:

肖强, 李鸿雁, 衣文平, 等. 控释与稳定尿素配施对土壤氮素迁移及冬小麦-夏玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(10): 1591–1599.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200117>

(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

[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>

[改性尿素硝酸铵溶液调控氮素挥发和淋溶的研究](#)

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

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1200–1209 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190811>

[华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价](#)

Economic benefits and carbon footprint of a spring mung bean–summer maize cropping system in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 910–919 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190916>

[秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氨排放的影响](#)

Effect of straw returning on ammonia emissions from soil in a wheat–maize multiple cropping system in the Guanzhong region, China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 513–522 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190627>

[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>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200117

肖强, 李鸿雁, 衣文平, 邹国元, 魏丹, 孙世友, 李丽霞. 控释与稳定尿素配施对土壤氮素迁移及冬小麦-夏玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1591-1599

XIAO Q, LI H Y, YI W P, ZOU G Y, WEI D, SUN S Y, LI L X. Effects of controlled-release and stable urea application on soil nitrogen transport and yields of winter wheat and summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1591-1599

控释与稳定尿素配施对土壤氮素迁移及 冬小麦-夏玉米产量的影响*

肖 强¹, 李鸿雁¹, 衣文平¹, 邹国元¹, 魏 丹¹, 孙世友^{2**}, 李丽霞^{1**}

(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: 控释与稳定尿素配施, 可通过双重调控作用增强对氮素的高效管理。本文以聚氨酯包膜控释尿素和新型复合型抑制剂涂覆尿素为试材, 研究了二者配施条件下, 调控冬小麦-夏玉米季施肥后氮素的动态迁移转化的效果, 为开发高效专用肥和农业面源污染治理提供新的思路和技术手段。试验设置不施氮肥(CK)、农民习惯施用尿素[CV, 冬小麦和夏玉米习惯施氮量分别为 285 kg(N)·hm⁻²和 225 kg(N)·hm⁻²], 优化施用尿素(OPT, 冬小麦和夏玉米优化施氮量分别为 199.50 kg(N)·hm⁻²和 157.50 kg(N)·hm⁻²), 优化施氮量下控释尿素+普通尿素(CRF1, 冬小麦和夏玉米控释氮分别占 40%和 30%)和 2 个优化施氮量下控释尿素+抑制剂涂覆尿素(CRF2, 冬小麦季和夏玉米季控释氮分别占 30%和 20%; CRF3, 冬小麦季和夏玉米季控释氮分别占 50%和 30%)。试验测定了氨挥发和土壤硝态氮及作物产量。结果表明: 在同等施氮量条件下, 与 OPT 相比, CRF1、CRF2 和 CRF3 在夏玉米、冬小麦季分别显著降低累积氨挥发量 24.90%~57.00%和 10.20%~27.80%, CRF2、CRF3 比 CRF1 分别显著降低 33.30%~42.80%和 12.20%~19.60%。施肥后土壤表层硝态氮含量升高和降低速率由快到慢依次为 CV、OPT、CRF1、CRF2 和 CRF3。夏玉米收获期土壤剖面残留硝态氮淋失风险由大到小依次是 CV、OPT、CRF1、CRF2 和 CRF3, 而冬小麦则为 CV、OPT、CRF2、CRF1 和 CRF3。与 CV 和 OPT 处理相比, 一次性优化施氮 CRF1、CRF2 和 CRF3 处理冬小麦、夏玉米产量没有显著差异。CRF2 和 CRF3 净收入与其他施氮处理相比略有增加, 与 CRF1 相比在夏玉米季增加 639 元·hm⁻²和 859 元·hm⁻², 在冬小麦季降低 1 196 元·hm⁻²和增加 61 元·hm⁻²。控释氮和稳定氮为 5:5(冬小麦)和 3:7(夏玉米)表现效果最佳。

关键词: 复合抑制剂; 涂覆工艺; 控释尿素; 氨挥发; 淋溶; 冬小麦-夏玉米; 产量

中图分类号: S145.6

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Effects of controlled-release and stable urea application on soil nitrogen transport and yields of winter wheat and summer maize*

* 国家重点研发计划课题(2017YFD0800604, 2018YFD0200608)、北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJ CX20200418)、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任务委托协议(CARS-02-88)资助

** 通信作者: 孙世友, 主要从事施肥与环境研究, E-mail: sunshiyou@126.com; 李丽霞, 主要从事施肥与环境研究, E-mail: ashleyllx@163.com

肖强, 主要从事新型肥料研究。E-mail: xqiang1978@163.com

收稿日期: 2020-02-21 接受日期: 2020-05-06

* The study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFD0800604, 2018YFD0200608), the Science and Technology Innovation Capacity Building Project of Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences (KJ CX20200418), 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 the Task Entrustment Agreement of National Corn Industry Technology System (CARS-02-88).

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

Received Feb. 21, 2020; accepted May 6, 2020

XIAO Qiang¹, LI Hongyan¹, YI Wenping¹, ZOU Guoyuan¹, WEI Dan¹, SUN Shiyu^{2**}, LI Lixia^{1**}

(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)

Abstract: The combined application of controlled-release and stable urea can enhance the efficiency of nitrogen management. In the present study, a combination of polyurethane-coated controlled-release urea and inhibitor-coated urea were used to study the effect of nitrogen transformation in winter wheat and summer maize. The results will provide new ideas and technical means for the development of high-efficiency fertilizer and limited non-point source pollution. The study included six treatments: no nitrogen application (control), traditional nitrogen application [CV, 285 and 225 kg(N)-hm⁻² in wheat and maize, respectively], optimized nitrogen application [OPT, 199.50 and 157.50 kg(N)-hm⁻² in wheat and maize, respectively], controlled-release urea + traditional urea application (CRF1, 40% and 30% controlled released nitrogen for wheat and maize, respectively), controlled-release urea + inhibitor-coated urea (CRF2, 30% and 20% controlled released nitrogen for wheat and maize, respectively), and controlled-release urea + inhibitor-coated urea (CRF3, 50% and 30% controlled released nitrogen for wheat and maize, respectively). CRF1, CRF2 and CRF3 were all the optimized nitrogen application, which significantly reduced cumulative ammonia volatilization during the summer maize and winter wheat seasons by 24.90%–57.00% and 10.20%–27.80%, respectively, compared with OPT treatment. At the same nitrogen application rate, the cumulative ammonia volatilization of CRF2 and CRF3 treatments were significantly lower than that of CRF1 treatment by 33.30%–42.80% and 12.20%–19.60% during the summer maize and winter wheat seasons, respectively. After fertilization, the rate of soil nitrate increase or decrease was greatest in CV treatment, followed by OPT, CRF1, CRF2, and CRF3 treatments. During the summer maize harvest period, the risk of residual nitrate leaching was highest in CV treatment, followed by OPT, CRF1, CRF2, and CRF3 treatments; whereas during the winter wheat season, leaching rate decreased as follows: CV, OPT, CRF2, CRF1, and CRF3. The yields of both winter wheat and summer maize under CRF1, CRF2, or CRF3 treatments were not significantly different from those of CV or OPT treatments. However, the net incomes of CRF2 and CRF3 treatments were 639 ¥·hm⁻² and 859 ¥·hm⁻² greater than that of CRF1 treatment during the summer maize season, whereas they were 1 196 ¥·hm⁻² less and 61 ¥·hm⁻² greater than that of CRF1 treatment during the winter wheat season. The favorable ratios of controlled-release nitrogen to stable nitrogen were 5 : 5 and 3 : 7 for winter wheat and summer maize, respectively, in the study area.

Keywords: Composite inhibitor; Coating process; Controlled release urea; Ammonia volatilization; Leaching; Winter wheat-summer maize; Yield

控释肥料在我国发展和应用已有数年,产品质量参差不齐,但能够在市场上认可的主要为聚烯烃包膜和聚氨酯包膜控释肥料^[1]。聚烯烃包膜肥料为首代产品,工艺比较成熟,应用程度相对较高,但是相对于聚氨酯包膜肥料来说成本相对高、产能略低、膜材降解性略低;而聚氨酯包膜肥料作为第 2 代产品,虽然有其自身优点,但在应用技术成熟度方面不如聚烯烃包膜肥料^[2-3]。近几年来,聚氨酯包膜肥料在某些区域夏玉米(*Zea mays*)上应用得到了一定的验证,但效果还需要进一步的优化和稳定,尤其在冬小麦(*Triticum aestivum*)、水稻(*Oryza sativa*)等作物上,需要提高其对氮素的调控性能^[4-7]。而含有抑制剂类的稳定性肥料,国内外研究的也较早,虽然已有一百余种产品,但只有 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)、氢醌(HQ)两种脲酶抑制剂和双氰胺(DCD)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)两种硝化抑制

剂已经得到实际应用并作为商品在市场流通,如果考虑到毒性等因素,脲酶抑制剂 NBPT 和硝化抑制剂 DMPP 是最有应用前景的两种抑制剂,但仍然存在易分解、淋失、效果不稳定的问题,受到多种因素的影响^[8]。温度是影响硝化抑制剂效果及有效性的重要因素,较高温度下抑制剂降解速率明显加快,半衰期缩短,挥发损失增多^[9-10]。降雨过多导致施肥后 NBPT 效果降低^[11],低土壤含水量条件下,DMPP 更易被土壤吸附,使得存留量增加^[12-13]。因此,目前稳定性尿素在玉米上应用虽然有一定稳定氮素,减少其损失的效果,但还有较大的提升空间,而在冬小麦、水稻等作物上难以一次性施用,还需要多次追肥。

控释肥料和稳定性肥料各有其优缺点。控释肥料的优点是氮素释放主要受温度影响,随温度变化释放期可调节,但只有 1 个释放高峰,如果季节跨

度大, 效果会减弱, 一般在冬小麦上的应用效果不佳; 稳定性肥料有效作用期短, 低温效果好于高温效果。因此, 如果能够优化组合两种肥料, 同时发挥两种肥料的优势^[14-15], 扬长避短, 让稳定性肥料调控前期氮素释放、控释肥料调控中后期氮素释放, 可能会进一步提高两种肥料在夏玉米上的应用效果, 同时在小麦上应用会取得一定的技术突破。目前国内在此方面的研究鲜见报道。本文通过合理组配控释氮素和稳定尿素, 采用这种双控技术研究对氮素的调控特征和效果, 以期更大程度地减少氮素损失, 降低环境污染风险, 增加经济效益。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

聚氨酯包膜控释尿素, 释放期为 60 d, 含纯氮 43.50% (四川好时吉化工有限公司生产); 抑制剂涂覆尿素 (普通尿素+NBPT+DMPP), 抑制剂用量为 0.43%, 含纯氮 45.10%; 抑制剂为北京百灵威科技有限公司生产, 抑制剂涂覆尿素为河北冀衡赛瑞化工有限公司生产。

1.2 试验布置

试验地点设置在河北省农业科学院大河实验站, 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 土层有机质含量 16.29 g·kg⁻¹、全氮 0.70 g·kg⁻¹、全磷 0.06 g·kg⁻¹、全钾 18.17 g·kg⁻¹、有效磷 5.40 mg·kg⁻¹、速效钾 62.00 mg·kg⁻¹, pH 8.34。

供试夏玉米品种为‘郑丹 958’, 冬小麦品种为‘轮选 987’。试验设置 5 个处理, 3 次重复。处理 1: CK, 不施氮肥; 处理 2: CV, 习惯施氮, 氮肥为普通尿素, 基追比为 1 1, 冬小麦和夏玉米施氮量分别为 285 kg(N)·hm⁻² 和 225 kg(N)·hm⁻²; 处理 3: OPT, 在处理 2 基础上优化施氮量, 根据长期定位试验和测土配方施肥结果, 冬小麦和夏玉米施氮量分别为 199.5 kg(N)·hm⁻² 和 157.5 kg(N)·hm⁻², 基追比为 1 1; 处理 4: CRF1, 为控释尿素和普通尿素配施, 控释氮 速效氮为 4 6 (冬小麦) 和 3 7 (夏玉米); 处理 5: CRF2, 为控释尿素和抑制剂涂覆尿素配施, 控释氮 稳定氮为 3 7 (冬小麦) 和 2 8 (夏玉米); 处理 6: CRF3, 为控释尿素和抑制剂涂覆尿素配施, 控释氮 稳定氮为 5 5 (冬小麦) 和 3 7 (夏玉米); 处理 4、5 和 6 均采用一次性基施方式, 施氮量与处理 3 相同。处理 4、5 和 6 配比的设计依据: 根据前期

研究基础及对国内该领域的认知, 以控释肥为核心的冬小麦和夏玉米专用肥, 控释氮含量一般分别在 40%~50%、30%~40% 较合理, 其余为速效氮含量。根据这个基础, 结合冬小麦、夏玉米需氮规律, 以及控释和抑制对氮素的作用期, 设计出这 3 个处理的配比。

试验田分为微区和小区, 各 18 个。每个微区面积为 2 m², 长 2 m, 宽 1 m, 四周用 PVC 板隔开, PVC 板埋深 0.60 m; 每个小区面积为 12 m², 长 4 m, 宽 3 m, 四周起垄, 小区间隔 0.50 m。微区内部各处理、小区内部各处理随机排列。处理间每个微区种植的夏玉米、冬小麦棵数相同, 夏玉米株行距分别为 25 cm 和 50 cm, 冬小麦行距为 13 cm, 苗期进行疏苗和定植, 保持棵数一致。夏玉米于 2018 年 6 月 26 日播种, 追肥于小喇叭口期进行; 冬小麦于 2018 年 10 月 15 日播种, 追肥于拔节期进行。夏玉米、冬小麦磷钾肥习惯用量分别为 75 kg(P₂O₅)·hm⁻²、90 kg(K₂O)·hm⁻² 和 90 kg(P₂O₅)·hm⁻²、60 kg(K₂O)·hm⁻², 所有处理施磷钾量相同, 均为一次性底施。浇水、除草措施等田间管理按照当地习惯进行, 微区、小区各自内部所有处理浇水量一致, 采用微喷灌方式。

1.3 取样及数据处理

在微区内, 施肥后约 15 d 内测定氮挥发, 直到氮挥发速率痕量为止, 同时每天取 0~20 cm 土层土样测定硝态氮含量, 10 d 后定期取样测定。

收获后用土钻取 0~200 cm 土层土样, 20 cm 为一层, 采用连续流动分析仪 (TRAACS 2000, Bran and Luebbe) 法测定硝态氮含量, 采用烘干法测定土壤质量含水量^[16]。

土壤氮挥发的捕获方法采用通气法^[17-18]。在施肥当天开始进行土壤氮挥发气体的收集, 施肥后每天 8:00—10:00 取样, 每天取样 1 次, 直至监测不到氮挥发时为止。

田间土壤氮挥发通量的计算公式为:

土壤氮挥发通量 (kg·hm⁻²·d⁻¹) = 单个装置每次所测氮量 / (捕获装置横截面积 × 每次连续捕获时间) (1)

小区播种采用机播, 只在收获期进行测产。收获测产时每个小区取整 3 行玉米植株, 取 2 m² 小麦, 待自然风干后测产。

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 控释与稳定尿素配施后土壤氮挥发特征

CV、OPT 处理分别在播种以及之后第 33 d(夏玉米)、124 d(冬小麦)时进行了肥料基施和追施, CRF1、CRF2 和 CRF3 处理在播种时进行肥料一次性底施。从玉米、小麦季施基、追肥后氮挥发特征可看出(图 1), 氮挥发速率整体上呈现出在第 2~3 d 左右达到峰值, 之后呈现放缓趋势。与小麦季相比, 玉米季氮挥发整体速率大, 挥发周期短, 其氮挥发剧烈程度显著强于小麦。在玉米季, CV 处理累积氮挥发量显著高于其他处理, 基施和追施肥料后分别达 $12.67 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $34.14 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其次是 OPT 处理, 基施后累积氮挥发量低于 CRF1 处理, 是因为

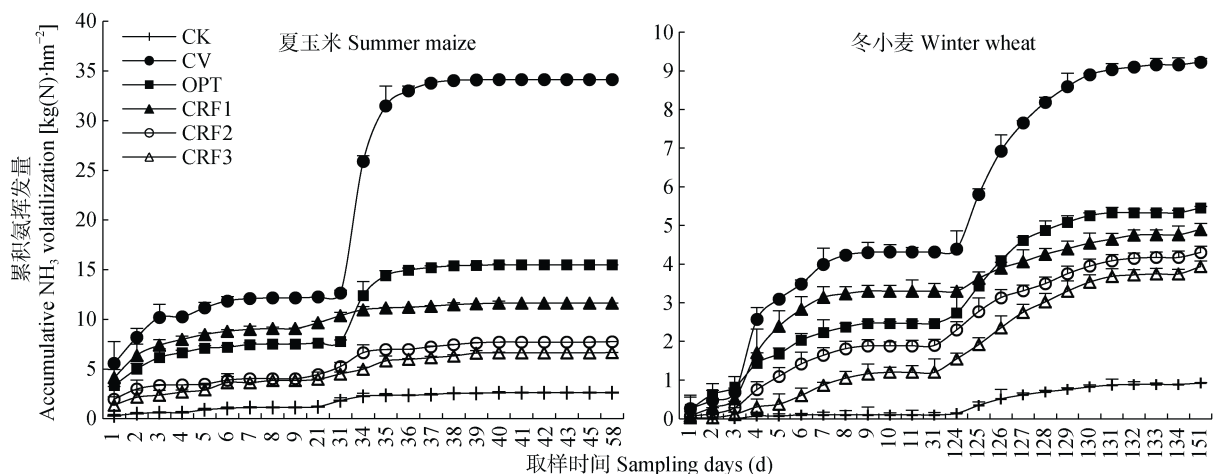


图 1 不同施肥处理夏玉米和冬小麦的累积氮挥发动态

Fig. 1 Accumulative NH_3 volatilization of summer maize and winter wheat under different fertilization treatments

CK: 不施氮肥; CV: 习惯施氮; OPT: 优化施氮量; CRF1: 控释尿素和普通尿素配施, 控释氮 速效氮为 4 6(冬小麦)和 3 7(夏玉米); CRF2: 控释尿素和抑制剂涂覆尿素配施, 控释氮 稳定抑制氮为 3 7(冬小麦)和 2 8(夏玉米); CRF3: 控释尿素和抑制剂涂覆尿素配施, 控释氮 稳定抑制氮为 5 5(冬小麦)和 3 7(夏玉米)。CK: no nitrogen application; CV: conventional urea application; OPT: optimized urea application; CRF1: controlled-release urea + common urea, controlled released nitrogen accounting for 40% and 30%, respectively for winter wheat and summer maize; CRF2: controlled-release urea + inhibitor coated urea, controlled released nitrogen accounting for 30% and 20%, respectively for winter wheat and summer maize; CRF3: controlled-release urea + inhibitor coated urea, controlled-release nitrogen accounting for 50% and 30%, respectively for winter wheat and summer maize.

小麦季累积氮挥发量最高的是 CV 处理, 基施和追施肥料后氮挥发累积量分别达 $4.31 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $9.23 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于其他处理。OPT 处理施基肥后的累积氮挥发量显著高于 CRF2 和 CRF3 处理, 但显著低于 CRF1 处理, 施追肥后显著高于 CRF1、CRF2 和 CRF3 处理。CRF1 累积氮挥发量显著高于 CRF2 和 CRF3 处理, 后两者差异不显著。CRF1、CRF2 和 CRF3 处理比 OPT 处理显著降低了累积氮挥发量 10.20%~27.80%, CRF2、CRF3 分别比 CRF1 显著降低 12.20%和 19.60%, CRF3 表现最好。从累积氮挥发曲线斜率可分析出, 基施后 CV、CRF1 和 CRF3 处理斜率最大处分别在施肥后第 4 d、6 d

基施肥料中速效氮肥的量小于后者, 但追肥后 CRF1、CRF2 和 CRF3 分别比 OPT 累积氮挥发量显著降低 24.90%~57.00%, 说明 OPT 即使是分次施肥, 如果不对氮素进行调控, 氮挥发损失量依然很高。CRF1、CRF2 和 CRF3 之间相比, 后两者由于对尿素实现了双重调控, 因此, 施肥后累积氮挥发量分别比 CRF1 显著降低 33.30%和 42.80%。此外, 虽然 CRF1、CRF2 和 CRF3 处理的肥料为一次性底施, 但在追肥期后亦有氮挥发产生, 说明在夏玉米拔节—喇叭口阶段这 3 个处理能够释放出一定量的氮素供夏玉米吸收, 均表现出了一定的缓释或者抑制作用。三者相比, 总体降低夏玉米氮挥发损失的效果 CRF3 最好。

和 7 d, 可能是氮挥发最强烈的时间。上述分析说明 CRF2 和 CRF3 处理控释和抑制作用双重调控氮素转化降低氮挥发量的效果优于 CRF1 单一调控氮素转化效果, 同时从曲线的变化趋势也可看出, 一次性底施 3 个处理在追肥期后能够释放出一定量的氮素供作物需要。

2.2 控释与稳定尿素配施后表层土壤硝态氮动态变化

从图 2 可看出, 肥料基施后 21 d 内(除第 8 d 外), 夏玉米 CV、OPT 和 CRF1 处理土壤硝态氮含量的变化均呈现出逐渐升高再降低的趋势。CV 处理硝态氮含量上升速率最快, 于第 3 d 达到峰值 $58.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,

之后下降的速率也最快, 第 6 d 时降低为 $26.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 第 8 d 时再次达到峰值, 为 $65.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 之后迅速下降, 至追肥前为 $15.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。OPT 处理由于施速效氮量少, 上升和下降的速率均慢于 CV 处理并于第 4 d 达到峰值 $49.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。一次性底施 3 个处理, 硝态氮含量高峰期都延后, 分别出现在第 21 d、37 d 和 31 d, CRF3 峰值最高。从整体趋势上看, CRF1 硝态氮含量上升速率大于 CRF2 和 CRF3, 说明抑制剂涂覆尿素部分起到了延缓氮素转化成硝态氮的作用。追施肥料后, CV、OPT 处理硝态氮含量再次

迅速升高, 第 2~4 d 出现峰值, 约第 8 d 后逐渐降低。CRF1、CRF2 和 CRF3 处理在第 33 d 后土壤表层依然保持相对较高的硝态氮含量, 整体趋势表现为 $\text{CRF3} > \text{CRF2} > \text{CRF1}$ 。在 40 d 后至夏玉米收获前, 一次性底施 3 个处理表层土壤硝态氮含量高于 OPT 处理的趋势逐渐明显, 在 58 d 时 CRF3 与 OPT 达显著差异, 但整体上与 CV 处理差异不显著, 这是因为 CV 处理施氮量高, 同时进行了追肥; CRF2 和 CRF3 处理硝态氮含量高于 CRF1 的趋势也越来越明显, 43~58 d 前后 CRF3 显著高于 CRF1 处理。

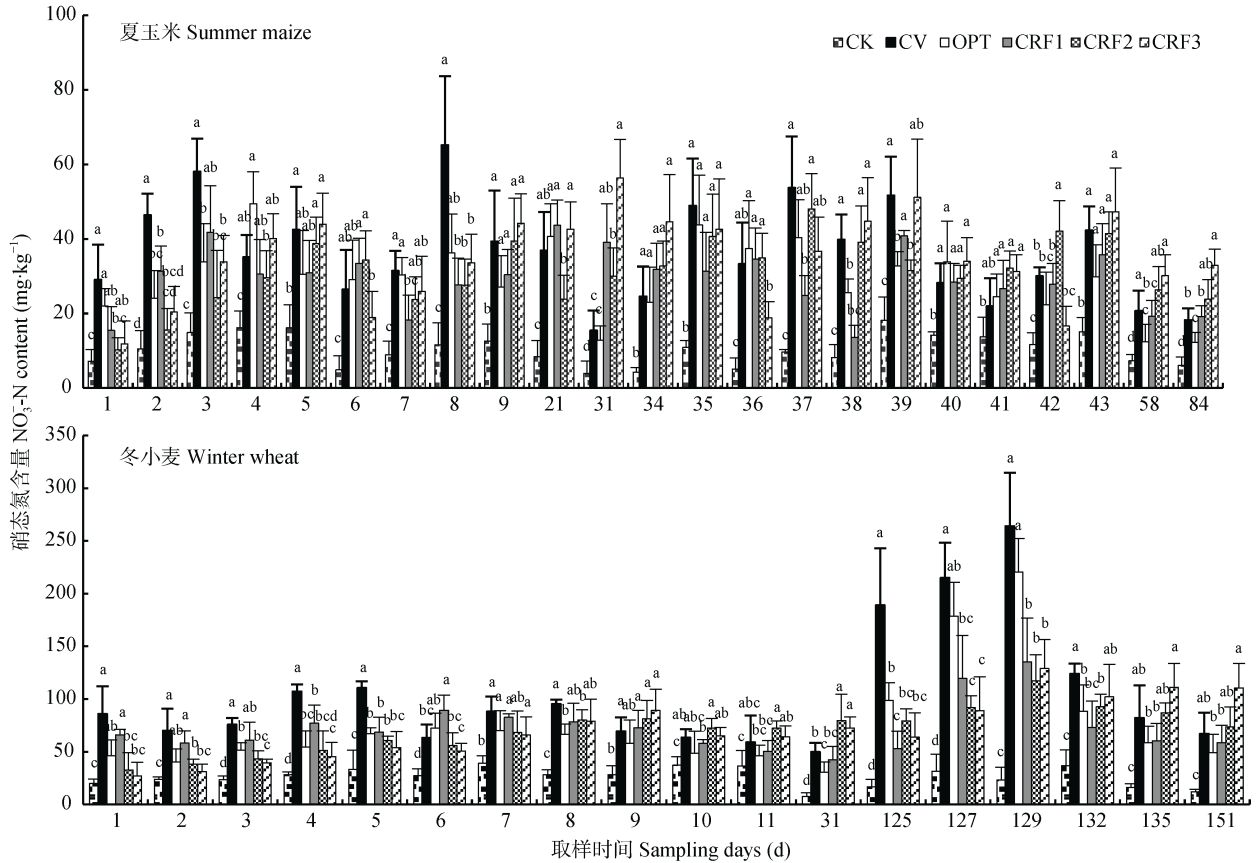


图 2 不同施肥处理夏玉米和冬小麦 0~20 cm 土壤的硝态氮含量

Fig. 2 NO_3^- -N contents in 0–20 cm soil layer under different fertilization treatments in summer maize and winter wheat seasons

CK: 不施氮肥; CV: 习惯施氮; OPT: 优化施氮量; CRF1: 控释尿素和普通尿素配施, 控释氮 速效氮为 4 6(冬小麦)和 3 7(夏玉米); CRF2: 控释尿素和抑制剂涂覆尿素配施, 控释氮 稳定抑制氮为 3 7(冬小麦)和 2 8(夏玉米); CRF3: 控释尿素和抑制剂涂覆尿素配施, 控释氮 稳定抑制氮为 5 5(冬小麦)和 3 7(夏玉米)。不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。CK: no nitrogen application; CV: conventional urea application; OPT: optimized urea application; CRF1: controlled-release urea + common urea, controlled released nitrogen accounting for 40% and 30%, respectively for winter wheat and summer maize; CRF2: controlled-release urea + inhibitor coated urea, controlled released nitrogen accounting for 30% and 20%, respectively for winter wheat and summer maize; CRF3: controlled-release urea + inhibitor coated urea, controlled-release nitrogen accounting for 50% and 30%, respectively for winter wheat and summer maize. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at 0.05 level.

冬小麦季基施、追施肥料后施氮处理土壤硝态氮含量显著高于夏玉米(图 2), 说明其淋溶强度弱。基施后追施前期间, 所有施氮处理表层土壤硝态氮含量都呈现出先升高后降低的趋势, 不过速率不同。CV 处理上升和下降速率最大, 在基施后第 5 d

达到峰值, 为 $110.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于同期其他处理; OPT 处理峰值出现在基施后第 6 d, 为 $72.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。追肥前 CRF1、CRF2 和 CRF3 处理表层土壤硝态氮含量缓慢增加, 分别在施氮后第 6 d、9 d 和 9 d 达到峰值($89.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $81.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

和 $89.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 比 CV 处理的峰值分别降低 19.11%、26.50%和 19.21%, 但均比 OPT 处理高; 到追肥之前(31 d), CRF3 已经显著高于 CV 和 OPT 处理。CRF1、CRF2 和 CRF3 处理间比较, 后两者延缓氮素转化的能力更强, 到基施后期追肥之前硝态氮含量已经显著高于 CRF1。从追施后(基施 124 d 后)可看出, CV 和 OPT 处理土壤硝态氮含量迅速上升, 并于 129 d 达到峰值, 为 $264.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $220.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于其他处理, 之后迅速下降, 至 151 d 时 OPT 处理已经显著低于 CRF3 处理。CRF1、CRF2 和 CRF3 处理虽然没有进行追肥, 但在追肥期也释放出了一定量的硝态氮, 在第 129 d 时土壤硝态氮含量再次达到高峰, 之后呈下降趋势, 但 CRF1 下降速率较快, CRF3 下降最慢, 至 151 d 时

CRF1 和 CRF3 土壤硝态氮达显著差异。

2.3 控释与稳定尿素配施后收获期土壤剖面硝态氮变化

从夏玉米收获期 2 m 土层内硝态氮含量分布(图 3)可看出, 表层 0~20 cm 内 CRF3 最高, 依次是 CRF2、CRF1、CV、OPT, 且 CRF3 显著高于后四者; 0~100 cm 土层内 CRF3 和 CRF2 呈现较高含量, 而 100 cm 以下 CV 处理硝态氮含量高于其他处理, 180~200 cm 土层内 CRF2 和 CRF3 处理硝态氮含量显著低于 CV 和 OPT 处理。夏玉米季多雨, CV 处理施氮量高且都为速效氮, 硝态氮淋失风险大, CRF2 和 CRF3 为控释尿素配施抑制剂涂覆尿素, 双重延缓氮素的释放和转化, 其作用比单一的控释尿素配施普通尿素在减少硝态氮淋失方面作用明显。

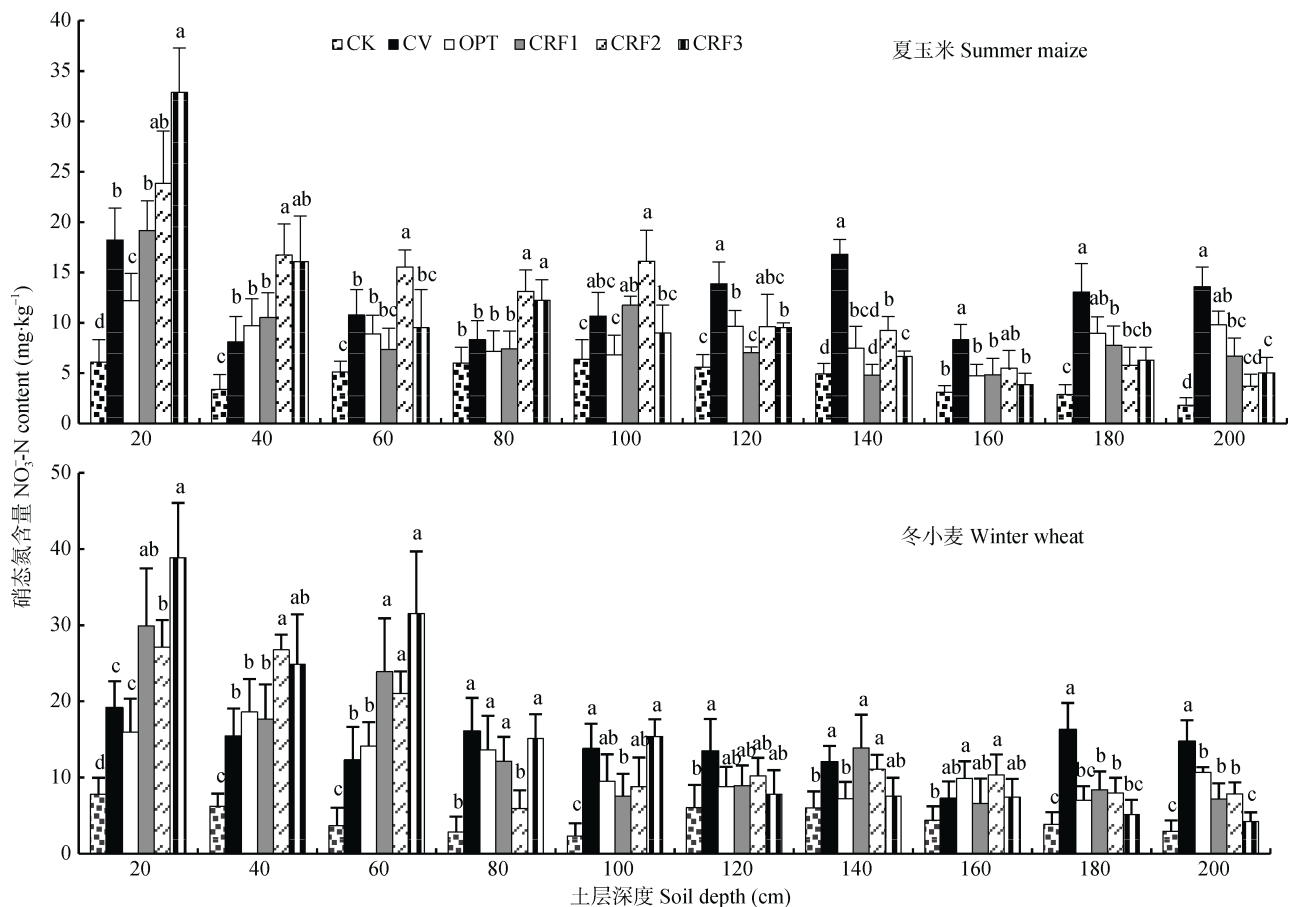


图 3 不同施肥处理夏玉米和冬小麦收获期土壤剖面硝态氮含量

Fig. 3 NO_3^- -N content of soil under different fertilization treatments in harvest period of summer maize and winter wheat

CK: 不施氮肥; CV: 习惯施氮; OPT: 优化施氮量; CRF1: 控释尿素和普通尿素配施, 控释氮 速效氮为 4 6(冬小麦)和 3 7(夏玉米); CRF2: 控释尿素和抑制剂涂覆尿素配施, 控释氮 稳定抑制氮为 3 7(冬小麦)和 2 8(夏玉米); CRF3: 控释尿素和抑制剂涂覆尿素配施, 控释氮 稳定抑制氮为 5 5(冬小麦)和 3 7(夏玉米)。不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。CK: no nitrogen application; CV: conventional urea application; OPT: optimized urea application; CRF1: controlled-release urea + common urea, controlled released nitrogen accounting for 40% and 30%, respectively for winter wheat and summer maize; CRF2: controlled-release urea + inhibitor coated urea, controlled released nitrogen accounting for 30% and 20%, respectively for winter wheat and summer maize; CRF3: controlled-release urea + inhibitor coated urea, controlled-release nitrogen accounting for 50% and 30%, respectively for winter wheat and summer maize. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at 0.05 level.

从冬小麦收获后土壤硝态氮含量分布可看出, CV 处理土壤硝态氮含量分布较均匀, 0~200 cm 土层硝态氮浓度变化幅度小, 说明整体淋溶较强。OPT 处理虽然施氮量少且分次施肥, 但硝态氮残留量比一次性底施 3 个处理小, 而且在 180~200 cm 土层内高于此 3 个处理, 说明向下淋溶强度大。CRF1、CRF2 和 CRF3 处理土壤硝态氮含量主要集中在 0~60 cm 土层内, 60 cm 以下土层硝态氮含量急剧下降。0~20 cm 土层内 CRF3 最高, CRF2 显著低于 CRF3, 180~200 cm 土层内 CRF2 显著高于 CRF3, 这与夏玉米收获后土壤硝态氮含量的分布情况不同。冬小麦生长期过长, 抑制剂稳定作用时间相对

较短, 而控释作用的周期较长, CRF1 比 CRF2 控释成分比例高, CRF2 调控能力相对较弱, CRF3 控释成分高于 CRF2、抑制成分高于 CRF1, 所以淋失风险最低。

2.4 控释与稳定尿素配施后对夏玉米和冬小麦产量及经济效益的影响

与 CV 处理相比, 一次性优化施肥 CRF1、CRF2 和 CRF3 处理夏玉米产量没有显著降低; CRF1 与 OPT、CRF2 和 CRF3 相比, 夏玉米产量略有下降但差异不显著。CRF2 和 CRF3 夏玉米净收入与其他施氮处理相比略有增加, 比 CRF1 处理分别增加 639 元·hm⁻²和 859 元·hm⁻²(表 1)。

表 1 不同施肥处理夏玉米和冬小麦的氮素利用率及经济效益

Table 1 Yields and economic benefits of summer maize and winter wheat under different fertilization treatments

作物 Crop	处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	产值 Production value (¥·hm ⁻²)	氮肥用量 N rate (kg·hm ⁻²)		氮肥成本 Cost of N fertilizer (¥·hm ⁻²)	追肥劳动力投入 Labor input for topdressing (¥·hm ⁻²)	净收入 Net income (¥·hm ⁻²)
				基肥 Basal	追肥 Topdressing			
夏玉米 Summer maize	CK	7 450±1 046a	16 390	0			0	16 390
	CV	8 232±751a	18 110	112.50	112.50	1 076	300	16 734
	OPT	8 195±785a	18 029	78.75	78.75	753	300	16 976
	CRF1	8 003±606a	17 607	157.50	0	864	0	16 743
	CRF2	8 315±902a	18 293	157.50	0	911	0	17 382
	CRF3	8 427±614a	18 539	157.50	0	937	0	17 602
冬小麦 Winter wheat	CK	6 031±466b	13 268	0			0	13 268
	CV	7 155±813ab	15 741	142.50	142.50	1 363	300	14 078
	OPT	6 536±557b	14 379	99.75	99.75	954	300	13 125
	CRF1	7 726±405a	16 997	199.50	0	1 141	0	15 856
	CRF2	7 203±904ab	15 847	199.50	0	1 187	0	14 660
	CRF3	7 805±242a	17 171	199.50	0	1 254	0	15 917

CK: 不施氮肥; CV: 习惯施肥; OPT: 优化施氮量; CRF1: 控释尿素和普通尿素配施, 控释氮速效氮为 4/6(冬小麦)和 3/7(夏玉米); CRF2: 控释尿素和抑制剂涂覆尿素配施, 控释氮稳定抑制氮为 3/7(冬小麦)和 2/8(夏玉米); CRF3: 控释尿素和抑制剂涂覆尿素配施, 控释氮稳定抑制氮为 5/5(冬小麦)和 3/7(夏玉米)。表内数据以 2018 年的市场价计: 普通尿素 2 200 元·t⁻¹, 控释尿素 3 100 元·t⁻¹, 新型复合抑制剂涂覆尿素 2 361 元·t⁻¹, 玉米 1 500 元·t⁻¹, 玉米追肥劳动力投入 300 元·hm⁻², 冬小麦 2 200 元·t⁻¹, 小麦追肥劳动力投入 300 元·hm⁻²。不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。CK: no nitrogen application; CV: conventional urea application; OPT: optimized urea application; CRF1: controlled-release urea + common urea, controlled released nitrogen accounting for 40% and 30%, respectively for winter wheat and summer maize; CRF2: controlled-release urea + inhibitor coated urea, controlled released nitrogen accounting for 30% and 20%, respectively for winter wheat and summer maize; CRF3: controlled-release urea + inhibitor coated urea, controlled-release nitrogen accounting for 50% and 30%, respectively for winter wheat and summer maize. Data in the table were calculated based on average market price in 2018. With conventional urea 2 200 ¥·t⁻¹, controlled release urea and urea coated with a new compound inhibitor were 3 100 ¥·t⁻¹ and 2 361 ¥·t⁻¹, respectively. The prices of maize and wheat were 1 500 ¥·t⁻¹ and 2 200 ¥·t⁻¹. Labor input for topdressing of wheat and maize was 300 ¥·hm⁻², respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at 0.05 level.

一次性优化施肥 CRF1、CRF2 和 CRF3 处理冬小麦产量高于 CV 和 OPT 处理, CRF1、CRF2 和 CRF3 之间差异不显著, CRF1 和 CRF3 显著高于 OPT 处理; 总体上看, CRF3 表现最佳, CRF2 在冬小麦上的调控效果差于夏玉米。CRF2 和 CRF3 冬小麦净收入与 CV 和 OPT 处理相比略有增加, 分别比 CRF1 降低

1 196 元·hm⁻²和增加 61 元·hm⁻²(表 1)。CRF1、CRF2 和 CRF3 处理有效减少了氮素挥发和淋溶, 从综合效益来看, CRF3 效果最好(表 1)。

3 讨论与结论

本研究表明, 控释尿素和抑制剂涂覆尿素配施

的两个处理(CRF2 和 CRF3)不仅比常规施肥(CV)和优化施肥(OPT)稳定氮素的作用更强,而且比控释尿素和普通尿素配施(CRF1)减少了氮素挥发量和淋失风险,这主要是因为控释和抑制双重调控的效果。以往的研究都是控释尿素和普通尿素相比,研究氮挥发损失量,并最终得出控释是减少氮挥发的较好技术^[19]。而本文的结论是控释和抑制双重调控的作用优于单一的控释作用。如卢艳艳等^[19]研究得出,冬小麦施基肥后,普通尿素、硫包膜和树脂包膜控释尿素土壤氮挥发通量峰值分别出现在施肥后第 3 d、6 d 和 7 d,而本文普通尿素、控释尿素配施普通尿素、控释尿素配施抑制剂涂覆尿素土壤氮挥发通量峰值分别出现在基施后第 4 d、6 d 和 7 d,控释和抑制的配合作用凸显。

夏玉米产量表现较好的是 CRF2 和 CRF3 处理,而冬小麦产量表现较好的则是 CRF1 和 CRF3。可能的原因是:夏玉米生长期短,温差变化幅度小,因此控释和抑制的双重调控作用发挥的更好;而冬小麦生长期长,需经历冻融和初夏高温,冬前抑制作用凸显,但到返青拔节期后,抑制的作用弱化,而控释期较长,在返青拔节期能继续发挥作用。由于 CRF3 控释部分所占比例比 CRF1 高、抑制部分所占比例比 CRF2 高,因此,三者中 CRF3 表现出最佳效果,而 CRF1 在冬小麦上相对于 CRF2 表现较好,CRF2 在夏玉米上相对于 CRF1 表现较好。冬小麦控释专用尿素中,一般控释氮和普通氮的最佳比例为 4:6^[20],控释氮的比例过高或过低都会影响氮素吸收和小麦产量。而本文的研究结果也间接验证了这一点。

施基肥后 CRF2 处理冬小麦季表层土壤硝态氮含量在后期呈现最高态势,说明在追肥前对氮素的调控效果优于 CRF3 和 CRF1,追肥后 CRF2 则差于 CRF3,说明施基肥后一段时间内抑制作用体现的更强,而基施到追施由于时间跨度大,施追肥后控释作用发挥的更强。同时进一步说明,抑制和控释作用各在某一方面或一阶段表现的效果更佳^[21],因此,将二者组合应用前景和意义深远,二者组合是解决抑制剂效果不稳定的有效途径,是肥料应用领域未来的发展方向之一^[22]。迄今为止只有日本研发出 Dd-Meister 缓控释肥,采用的是控释和抑制双重包膜技术,目前被广泛用于日本的茶叶生产中,该缓控释肥既可以减少氮肥施用量,还可以提高茶叶的品质,减少对环境的负面影响^[23]。此外,Frame 等^[24]也用硫酸钙、硫酸钾与抑制剂结合对尿素包膜,显

著减少了氮挥发,并为作物提供了少量硫^[25]。其他采用控释和抑制双重调控的研究鲜见报道。

相同施氮量下,控释尿素与普通尿素、控释尿素与稳定尿素配施均比普通尿素减少氮挥发量、硝态氮淋失风险,增加经济效益。当控释氮比例相同时,在夏玉米季,控释尿素与稳定尿素配施比控释尿素与普通尿素配施减少氮挥发量、降低硝态氮淋失风险、增加经济效益。在冬小麦季,控释尿素与稳定尿素配施(控释氮:稳定氮为 5:5)比控释尿素和普通尿素配施(控释氮:速效氮为 4:6)减少氮挥发量、硝态氮淋失风险,增加经济效益,但控释尿素与稳定尿素配施(控释氮:稳定氮为 3:7)则不如控释尿素和普通尿素配施(控释氮:速效氮为 4:6)的调控效果好。

参考文献 References

- [1] 范妮. 我国缓/控释肥的制备及应用研究进展[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(4): 92-94
FAN N. Research progress in preparation and application of slow/controlled release fertilizer in China[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2019, 65(4): 92-94
- [2] LU P F, ZHANG Y F, JIA C, et al. Degradation of polyurethane coating materials from liquefied wheat straw for controlled release fertilizers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(41): 44021
- [3] ZHANG X, JIANG Y H, JIA C, et al. Preparation and characterization of polyurethane based on dimer acid for environment-friendly controlled release fertilizers[J]. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2019, 58(14): 1571-1584
- [4] CAI G X, CHEN D L, DING H, et al. Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2/3): 187-195
- [5] BOURAIMA A K, HE B H, TIAN T Q. Runoff, nitrogen (N) and phosphorus (P) losses from purple slope cropland soil under rating fertilization in Three Gorges Region[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(5): 4541-4550
- [6] 黄巧义, 唐拴虎, 张发宝, 等. 减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 829-838
HUANG Q Y, TANG S H, ZHANG F B, et al. Effect of combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 829-838
- [7] 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
- [8] 程冬冬, 赵贵哲, 刘亚青, 等. 土壤温度、土壤含水量对高分子缓释肥养分释放及土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 216–220
CHENG D D, ZHAO G Z, LIU Y Q, et al. Influences of soil temperature and moisture on nutrients release of polymeric slow release fertilizer and soil enzyme activity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6): 216–220
- [9] 史云峰, 赵牧秋, 张丽莉. 双氰胺(DCD)在砖红壤中硝化抑制效果的影响因素研究[J]. 农业科学与技术, 2011, 12(10): 1505–1508
SHI Y F, ZHAO M Q, ZHANG L L. Research on the factors affecting nitrification inhibition of dicyandiamide (DCD) in Latosol[J]. Agricultural Science & Technology, 2011, 12(10): 1505–1508
- [10] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 土壤温度和含水量交互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
ZHOU X, WU L H, DAI F. Inhibition effect of inhibitors on nitrogen transformation affected by interaction of soil temperature and water content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 106–115
- [11] CANTARELLA H, TRIVELIN P C O, CONTIN T L M, et al. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets[J]. Scientia Agricola, 2008, 65(4): 397–401
- [12] BARTH G, TUCHER S V, SCHMIDHALTER U. Influence of soil parameters on the efficiency of the new nitrification inhibitor DMPP (ENTECC®)[M]/HORST W J, SCHENK M K, BÜRKERT A, et al. Plant Nutrition. Dordrecht: Springer, 2001: 756–757
- [13] 薛妍, 武志杰, 张丽莉, 等. 土壤含水量、pH 及有机质对 DMPP 硝化抑制效果的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2663–2669
XUE Y, WU Z J, ZHANG L L, et al. Inhibitory effect of DMPP on soil nitrification as affected by soil moisture content, pH and organic matter[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2663–2669
- [14] 李东坡, 武志杰, 梁成华, 等. 丙烯酸树脂包膜尿素肥料研制及其控释效果[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 218–224
LI D P, WU Z J, LIANG C H, et al. Preparation of acrylic resin coated urea fertilizers and their controlled effects[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(12): 218–224
- [15] 张文学. 生化抑制剂对稻田氮素转化的影响及机理[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014: 11–12
ZHANG W X. The effect of biochemical inhibitor on nitrogen transformation in paddy field and its mechanism[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014: 11–12
- [16] 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
- [17] 朱志锋, 李同花, 焦卫平, 等. 不同类型缓控释肥对小麦产量的影响[J]. 磷肥与复肥, 2019, 34(11): 49–51
ZHU Z F, LI T H, JIAO W P, et al. Effect of different types of slow controlled release fertilizers on wheat yield[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2019, 34(11): 49–51
- [18] 李欠欠. 脲酶抑制剂 LIMUS 对我国农田氨减排及作物产量和氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 1–12
LI Q Q. Effect of urease inhibitor LIMUS on ammonia mitigation and crop yield and nitrogen use efficiency in different croplands of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014: 1–12
- [19] 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
- [20] 衣文平, 孙哲, 武良, 等. 包膜控释尿素与普通尿素配施对冬小麦生长发育及土壤硝态氮的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 687–693
YI W P, SUN Z, WU L, et al. Effects of coated controlled release urea combined with conventional urea on winter wheat growth and soil NO_3^- -N[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 687–693
- [21] 山楠. 京郊小麦-玉米轮作体系氮素利用与损失研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014: 3–10
SHAN N. Nitrogen utilization and loss in winter wheat-summer maize rotation system of Beijing suburb[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2014: 3–10
- [22] 张英鹏, 李洪杰, 刘兆辉, 等. 农田减氮调控施肥对华北潮土区小麦-玉米轮作体系氮素损失的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1179–1187
ZHANG Y P, LI H J, LIU Z H, et al. Effect of reducing N and regulated fertilization on N loss from wheat-maize rotation system of farmland in Chao soil region of North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1179–1187
- [23] 俞巧钢, 殷建祯, 马军伟, 等. 硝化抑制剂 DMPP 应用研究进展及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1057–1066
YU Q G, YIN J Z, MA J W, et al. Effects of nitrification inhibitor DMPP application in agricultural ecosystems and their influencing factors: A review[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(6): 1057–1066
- [24] FRAME W H, ALLEY M M, WHITEHURST G B, et al. In vitro evaluation of coatings to control ammonia volatilization from surface-applied urea[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(5): 1201–1207
- [25] SRIDHARAN G V, HAZARIKA D, BHAT M A, et al. Nitrification inhibition studies of neem coating on urea prills[J]. Asian Journal of Chemistry, 2017, 29(1): 196–198