

几种硝化抑制剂和包硫尿素(SCU)对土壤N素形态和小麦产量的影响

李永强^{1,2}, 王雅楣¹, 杨越超¹, 贾继文¹, 解璐晗¹, 姚瑶¹, 焦树英^{1*}

(1.土壤资源高效利用国家工程实验室/山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2.内蒙古农业大学生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要:采用土壤盆栽法,研究了双氰胺(DCD)、硫脲(THU)和硫脲甲醛树脂(TFR)以及包硫尿素(SCU)对土壤氮素形态和小麦产量的影响。试验共设不施氮(CK)、单施尿素、包硫尿素(SCU)、以及尿素分别与DCD、THA、TUF的3个浓度梯度(分别按尿素用量的0.5%、1%、2%)配合施用共12个处理。结果表明:随添加浓度的增加,硝化抑制作用逐渐增强,高剂量硝化抑制剂显著降低土壤 NO_3^- -N含量,在2%添加浓度下,DCD、THU、TFR的土壤 NO_3^- -N浓度分别比单施尿素降低29%、22%和14%,对土壤表观硝化率的抑制强度也是2%DCD>2%THU>2%TFR;SCU处理与2%DCD作用强度接近,且在施用早期就体现抑制效果,并在追肥后第74d土壤表观硝化率显著低于使用硝化抑制剂的处理($P<0.05$);硝化抑制剂和SCU都可以使土壤 NH_4^+ -N含量稳定在较高的水平,抑制剂用量越多,土壤 NH_4^+ -N含量越高;与单施尿素相比,尿素+DCD模式,均可提高小麦产量,且在0.5%、1%、2%添加浓度,都达到显著水平($P<0.05$);THU在1.0%和2.0%添加浓度,小麦产量显著高于单施尿素,但增产效果次于DCD。总体上,包硫尿素(SCU)比硝化抑制剂在控释氮素方面效果更持久,而3种硝化抑制剂中,在控制土壤 NH_4^+ -N转化、土壤硝化抑制方面,DCD和THU优于TFR;作为外源添加物的抑制剂长期应用可能对土壤环境造成潜在的危害,不同硝化抑制在土壤中的形态归趋和长期作用还有待进一步研究。

关键词:氮肥增效剂;双氰胺;硫脲;硫脲甲醛树脂;氮素形态

中图分类号:S145.6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2016)03-0230-08

doi: 10.13254/j.jare.2016.0031

引用格式:

李永强, 王雅楣, 杨越超, 等. 几种硝化抑制剂和包硫尿素(SCU)对土壤N素形态和小麦产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3): 230-237.

LI Yong-qiang, WANG Ya-mei, YANG Yue-chao, et al. Effects of Nitrification Inhibitors and Sulphur Coated Urea (SCU) on Different Nitrogen Sources and Wheat Yield[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3): 230-237.

Effects of Nitrification Inhibitors and Sulphur Coated Urea(SCU) on Different Nitrogen Sources and Wheat Yield

LI Yong-qiang^{1,2}, WANG Ya-mei¹, YANG Yue-chao¹, JIA Ji-wen¹, XIE Lu-han¹, YAO Yao¹, JIAO Shu-ying^{1*}

(1.National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 2.College of Ecological and Environmental Sciences, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Nitrogen is essential for plant growth and health, and it is also a limiting factor for the growth in most agricultural systems. Intensive N fertilizer application has become the traditional habit for agricultural producers in China because of its importance to plant productivity and agricultural land profitability. But some problems have appeared with the increase of the amount of nitrogen fertilizer applied, urea used in crops is easy to lose from volatilization or leaching. Therefore, current crop management practices lead to a highly nitrifying soil environments. Nitrogen emission is the main source of soil acidity and environmental pollution. Several methods for the use of slow controlled release urea have been reported to be used to control the pollution and to enhance nitrogen use efficiency. There is a growing interest in the formulations of

收稿日期:2016-01-22

基金项目:国家自然科学基金(31302014);中国科学院战略性先导科技专题(XDA0505040303);国家博士后科学基金(2011M501158,2012T50589);山东省自然科学基金(ZR2009DQ007)

作者简介:李永强(1976—),男,内蒙古包头人,在读博士,讲师,主要从事草地土壤学教学和科研工作。E-mail:lyqlinda@163.com

*通信作者:焦树英 E-mail:jshysd@163.com

coated chemical fertilizers with both urease inhibitor and nitrification inhibitor. Urease inhibitor and nitrification inhibitor may improve urea N-use efficiency and minimize N losses by gaseous emissions of ammonia(NH_3) to the atmosphere and nitrate(NO_3^-) leaching into the surface and ground water. Dicyandiamide(DCD) is a nitrification inhibitor that has been studied for many years, it can effectively inhibit nitrification and N_2O emission in many agricultural ecosystems. However, limited information is available on the use of the combination of nitrification inhibitor and urease inhibitor applied with urea fertilizer, especially for thiourea(THU) and thiourea formaldehyde resin(TFR) applications. Therefore the purpose of this study is to investigate the effect of urea with different inhibitors to improve the efficiency of nitrogen utilization. A field pot experiment was conducted to explore how to increase the concentration of DCD/THU/TFR/sulfur-coated urea(SCU) to affect the transformation of soil nitrogen and wheat yield. The experiment was designed for twelve treatments which included no nitrogen(CK), only urea, SCU and the combination use of DCD, TFR, THU three concentration gradients(0.5%, 1%, 2% of urea dosage) with urea respectively. The results showed; the inhibition of nitrification was gradually enhanced with the increase of its concentration, high dose nitrification inhibitor decreased the content of soil NO_3^- -N significantly, the soil NO_3^- -N concentration with DCD, THU, TFR at the 2% dosage were lower than that with only urea by 29%, 22% and 14% respectively, and the inhibition effect of soil apparent nitrification rate was also 2%DCD>2%THU>2%TFR. The SCU treatment effect was close to the 2% DCD function strength, and it reflected the inhibition effect in the early stage of application, the soil apparent nitrification rate in the seventy-fourth days after fertilization was significantly lower than that of using the nitrification inhibition($P<0.05$). Both of nitrification inhibitor and SCU could make the soil NH_4^+ -N concentration at a higher level, and the more inhibitor dosage, the higher the content of NH_4^+ -N in soil. Compared with the single application of urea, urea + DCD model could all increase wheat yield at 0.5%, 1%, 2% concentration and reached a significant level($P<0.05$). When THU was added at 1% and 2% concentration, wheat yield was significantly higher than that of the single application of urea, but the increase yield effect was lower than that of DCD treatment. On the whole, the effect of SCU on the control and release nitrogen was more lasting than that of nitrification inhibitor, among three nitrification inhibitors, TFR and DCD were better than THU in controlling soil ammonia nitrogen transformation, soil nitrification inhibition and urease inhibition. The study can provide scientific basis for the screening of nitrification inhibitors and coated fertilizers, but the long-term use of exogenous additives may cause potential harm to soil environment, so it need to be further studied about the morphological transformation and long-term role of different nitrification inhibitors in the soil.

Keywords: nitrogen fertilizer synergist; DCD; THU; TFR; nitrogen sources

中国是世界氮肥生产和消费的第一大国^[1],在过去几十年间,增施氮肥对粮食增产和社会稳定起到十分重要的作用,得到国内外的高度认可^[2-3]。在我国的农业肥料结构中,氮肥的施用占化肥总施用量的61.2%,而以尿素为主的酰胺态氮肥施用量占到氮肥总量的一半以上^[4]。高氮素投入的农业生产方式带来许多环境问题:氨挥发、氨淋溶和 N_2O 等形式的氮损失导致水体富营养化和气候变暖^[4-6];施肥产生的活性氮向大气排放,由此产生的气溶胶/细颗粒物(如PM_{2.5})是导致空气质量下降或大气污染的重要原因^[2]。1980—2010年间,中国人为源活性氮产生量增加了近3倍,其中主要增长来自于化肥和工业用氮(从 $1.140\times 10^4\text{ t}$ 增加到 $3.710\times 10^4\text{ t}$)^[7]。1998—2013年,我国小麦单位面积氮肥施用量增长接近200%,但单产水平却只提升了50%,作物氮素利用率远低于世界平均水平^[2]。2015年农业部推出《到2020年化肥使用量零增长行动方案》,目的就是技术和政策层面对肥料使用进行干预,在保证食物供给的同时,如何实现氮肥减排是当前中国解决农业环境问题和农业可持续发展的焦点问题。

尿素进入土壤中,首先在脲酶作用下水解为氨,在短时间内氨在土壤中积聚,在一定条件下部分以气态形式挥发损失;同时氨在微生物作用下被氧化成硝态氮,硝态氮易被淋失或发生硝化作用以温室气体的形式散失^[8]。朱兆良^[1]对我国农田化肥氮的去向进行了初步估计,认为作物吸收35%、氨挥发11%、表观硝化-反硝化34%、淋洗损失2%、径流损失5%、以及未知部分13%。尽管这一估计有很大的不确定性,但总的来看,氨挥发和硝化-反硝化,是造成氮素损失的主要途径。使用缓控释肥,被认为是解决农田N素污染的有效方法,并已经显示其效果和很好的应用前景^[8-10]。缓控释肥包括尿素改性及类似物、化学合成缓释肥、包膜肥料等类型,其中包膜肥料占到缓控释肥总量的50%以上^[11]。但包膜材料长期施入土壤,造成土壤污染或影响土壤团粒结构的污染风险增加^[12]。硝化抑制剂在适宜条件下,能有效提高铵态或酰胺态氮肥施入土中 NH_4^+ -N含量,削弱 NO_3^- -N形成,从而在一定程度上降低N的损失;人们研究开发了各种脲酶/硝化抑制剂,通过抑制尿素水解和硝化反应的限速步骤来达到提高氮肥利用率并减轻环境污染的目的^[10],氮素肥料

混合硝化抑制剂等也被认为是有效的缓控释肥类型。国内外学者对氢醌(HQ)、双氰胺(DCD)等抑制剂的研究表明,脲酶/硝化抑制剂不同程度减少淋溶和 N_2O 的排放,提高作物氮素利用效率,国内外许多复合肥产品中都含有一定剂量的硫脲。新西兰林肯大学Di等^[13]通过10多年的研究发现,向添加高浓度氮肥的放牧草地土壤中喷施水溶态的DCD可减少42%~83%的硝酸盐淋失,降低40%~82%的 N_2O 总排放量,DCD对硝酸盐淋失和 N_2O 总排放量的平均抑制率分别达61%和67%;但也有研究认为,应用DCD会增加氨挥发,造成5%~16%氮素损失^[14]。抑制剂类型、土壤类型、添加浓度等因素会不同程度影响氮肥增效剂的使用效果^[13-15]。为此,本文对双氰胺(DCD)、硫脲(THU)和硫脲甲醛树脂(TFR)及包硫尿素(SCU)进行综合比较,探讨不同硝化抑制剂用量和形态与包膜肥料SCU对盆栽小麦土壤氮素形态和小麦产量的影响,为今后缓控释肥的研究和筛选提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

室外盆栽试验从2012年10月至2013年6月于山东农业大学试验站进行。试验地属于温带半湿润大陆性季风气候,年平均温度为12.8℃,试验期间平均温度为18.9℃。年降雨量为688 mm,65%的降雨主要集中在6、7、8月3个月,年平均相对湿度为66%。供试土壤类型为山东农业大学南校试验站试验地棕壤,取耕作层(0~20 cm)的新鲜土壤后,去除杂草根系和较大石砾,过4 mm筛,装盆待用。土壤有机质含量10.57 g·kg⁻¹,全氮0.63 g·kg⁻¹,有效磷38.24 mg·kg⁻¹,速效钾91.53 mg·kg⁻¹,阳离子交换量6.38 cmol·kg⁻¹。供试作物小麦品种为济麦22(*Triticum aestivum* L.)。

1.2 试验设计

采用尿素+双氰胺(DCD)、尿素+硫脲(THU)、尿素+硫脲甲醛树脂(TFR)、包硫尿素(SCU)、单施尿素(urea)、CK(不施氮肥),共6种处理模式。其中,DCD、THU、TFR 3个处理方式分别设置3个用量梯度,分别按照尿素施用量的0.5%、1%、2%与尿素配合施入,共计12个处理,详见表1。

采用田间盆栽方法,盆器口径32 cm,底径25 cm,高32 cm。盆内装土至27 cm,每盆装土20 kg,尿素施用量按照1 g 尿素·kg⁻¹土壤施用。于2012年10月6日播种小麦,成苗后每盆保留10株长势良好、较

表1 试验处理

Table 1 The experiment design

处理 Treatment	用量及说明 Instructions		
尿素+双氰胺 urea+DCD	DCD/GR1(0.5%)	DCD/GR2(1%)	DCD/GR3(2%)
尿素+硫脲 urea+THU	THU/GR2(0.5%)	THU/GR2(1%)	THU/GR3(2%)
尿素+硫脲甲醛树脂 urea+TFR	TFR/GR1(0.5%)	TFR/GR2(1%)	TFR/GR3(2%)
包硫尿素 SCU	包硫尿素 Sulfur-coated urea		
单施尿素 urea	尿素 urea		
对照 CK	不施氮肥 No nitrogen		

注:GR1、GR2、GR3 指对应硝化抑制剂添加量为尿素用量的0.5%、1%、2%。

一致的幼苗;12个处理,每个处理10次重复,共120盆。按表1设计,20 g 尿素与相应比例的不同硝化抑制剂充分混合均匀后30%以基肥施入,70%在拔节期前追施,混合前将尿素磨细。采用KH₂PO₄作为P、K肥来源,每盆施15 g。包硫尿素的用量按尿素成分折算后确定,使N素含量与其他处理一致。KH₂PO₄作为基肥,与土壤充分混合后装盆,于2013年3月25日追施剩余70%的尿素+不同增效剂混合物。

1.3 取样和测定方法

在小麦拔节期2013年4月11日(追肥后17 d)、抽穗期4月25日(追肥后31 d)、开花期5月11日(追肥后47 d)、灌浆期5月27日(追肥后63 d)、成熟期6月7日(追肥后74 d)5个时期进行盆栽土壤的动态调查和取样。在盆内均匀选4个点,注意避开盆缘和根系,用直径为10 mm的土钻取土,4钻混合;每个处理10盆,第一次取样选前5盆作为重复,取样后用钻孔周边土壤回填,第二次取样选取后5盆进行取样,后面取样依次轮替,尽量减少取样对盆栽土壤干扰的影响。每次取样后,带回实验室冷藏(4℃)并及时进行土壤分析。

土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N:新鲜土样过2 mm筛,用0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂溶液浸提,水土比10:1,用全自动连续流动分析仪(Alliance公司,法国)测定浸提液中的NH₄⁺-N、NO₃⁻-N浓度^[16];土壤表观硝化率:土壤表观硝化率为土壤中NO₃⁻-N浓度与土壤无机氮总量之比^[17-18];土壤全氮:凯氏定氮法。

1.4 数据分析

采用General linear model(GLM)单变量多因素方差分析判断不同硝化抑制剂类型、不同浓度、不同采样日期土壤表观硝化率的差异显著性,若差异达显著水平($P<0.05$),则采用最小显著差数法(least signifi-

cant difference, LSD)对均值进行多重比较。采用单因素方差分析(one-way-ANOVA)判断不同处理土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量、小麦产量的显著性。

数据整理、制图采用 Excel 2003 软件实现, GLM 单变量多因素方差分析、one-way ANOVA 由 SAS System 9.0 软件完成。

2 结果与分析

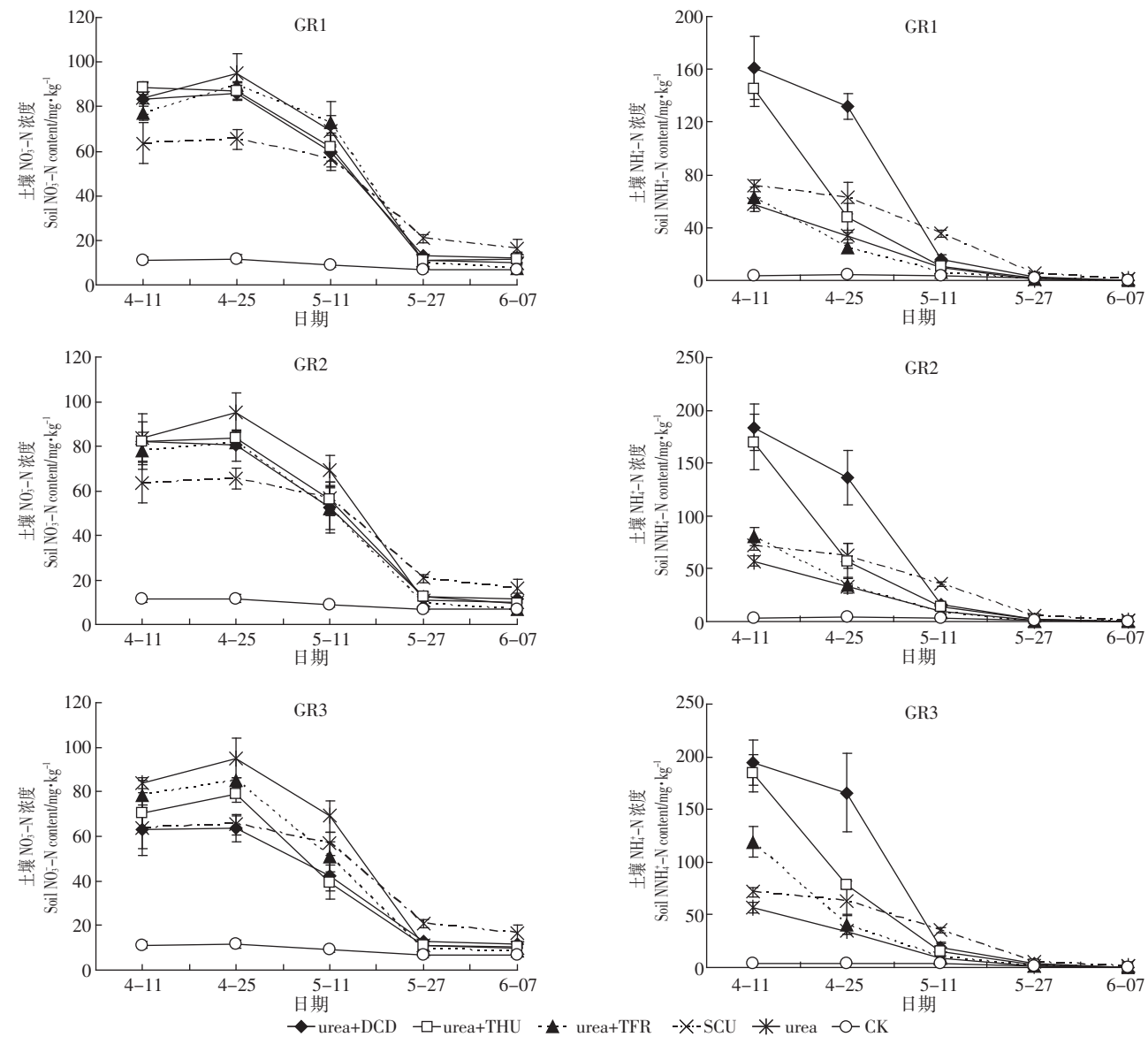
2.1 对土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度的影响

同一时期添加抑制剂和包硫尿素处理的土壤 NO_3^- -N 含量都显著低于单施尿素处理(图 1),表明不同抑制

剂和 SCU 可以抑制土壤 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 的氧化,降低土壤 NO_3^- -N 浓度,并且随着硝化抑制剂用量越大,土壤中 NO_3^- -N 浓度降低越多。

除 CK 外,所有处理在追肥后,随时间推移,土壤 NO_3^- -N 含量在第 31 d(4 月 25 日)达到各取样时间点的峰值,然后在第 63 d(5 月 27 日)降到与 CK 类似水平。

抑制剂用量为 0.5% 时,3 种硝化抑制剂之间降低土壤 NO_3^- -N 的作用无显著差异($P>0.05$),但 3 种抑制剂均使在峰值期(4 月 25 日)的 NO_3^- -N 浓度显著小于单施尿素方式($P<0.05$),DCD、THU 和 TFR 分别



注:GR1、GR2、GR3 对应硝化抑制剂添加量为 urea 用量的 0.5%、1%、2%,图中数据为 5 次重复的平均值及标准方差。

图 1 不同处理土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度动态变化

Figure 1 Dynamics of soil NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents under different treatments

使 $\text{NO}_3\text{-N}$ 降低了 9.36%、8.62%、5.89%；但到第 47 d (5 月 11 日)，只有 DCD 和 THU 显著低于尿素 ($P<0.05$)，分别降低 15.17% 和 10.71%。当用量为 1% 时，3 种抑制剂均表现出显著的降低土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的作用，但三者间差异不显著，作用强度接近。当用量为 2% 时，3 种抑制剂抑制效果增强，且各处理间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈现出显著性差异 ($P<0.05$)。与尿素相比，当用量为 2% 时，DCD、THU 和 TFR 在第 17 d (4 月 11 日) 分别使 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度降低 25.06%、15.63% 和 6.56%，在第 31 d 时分别使 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度降低 33.12%、17.24% 和 10.83%。3 种硝化抑制剂 DCD 降低 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度最多，THU 次之，TFR 最少，即硝化作用强度 2%DCD>2% THU>2%TFR。SCU 在第 17 d (4 月 11 日)、31 d (4 月 25 日) 分别使 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度降低了 24.11% 和 31.23%，与同一时期 2%DCD 的 25.06% 和 33.12% 接近，两者作用强度接近。SCU 的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度在追肥后的第 17 d 和第 31 d 显著低于其他处理 ($P<0.05$)。

土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量变化与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量变化规律相反，与单施尿素相比，硝化抑制剂和 SCU 提高了土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量，随着抑制剂用量的增加， $\text{NH}_4\text{-N}$ 增加的越多 (图 1)。除 CK 外，各处理 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量都呈现随施用时间的延续逐渐降低的变化趋势；当硝化抑制剂用量为 0.5% 时，DCD 和 THU 的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度在第 17、31 d 显著高于尿素，且 DCD>THU，二者差异显著 ($P<0.05$)，SCU 在第 31、47 d 显著高于尿素 ($P<0.05$)，而 TFR 与尿素无差异，说明该用量的 TFR 未能有效提高土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度。第 17 d 各处理 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度排序为 DCD>THU>SCU，第 31 d 为 DCD>SCU>THU，而到第 47 d，SCU 的浓度显著高于 DCD 和 THU。DCD 和 THU 在前期 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度高于 SCU，而在后期低于 SCU。

当硝化抑制剂用量为 2% 时，DCD 在第 17 d 出

现 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度最大值 $194.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，比单施尿素高出 238.33%，追肥后第 31 d 高 394.03%。2% DCD 和 SCU 处理提高土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量的能力最强，前者体现在增加 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的量最多，SCU 虽然提高的量少，但持续时间较长，后期第 47 d 时 SCU 的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度高于 2%DCD，前者使浓度提高了 280.65%，后者提高 103.23%。2%THU 增加土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的能力次之，第 17 d 时与 2%DCD 无差异，但到第 31 d $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度即大幅度降低，显著低于 DCD。2%TFR 仅在第 17 d 显著高于单施尿素，效果最弱且持续时间最短。

2.2 对土壤表观硝化率的影响

添加双氰胺、硫脲、硫脲甲醛树脂处理之间的土壤表观硝化率存在显著差异 ($F=277.08, P<0.001$, 表 2)。硝化抑制剂和 SCU 处理的表观硝化率均小于单施尿素处理 (表 3)，表明各处理有效抑制了硝化反应，且对于同一种硝化抑制剂，表观硝化率随抑制剂用量增大而显著减小。

3 种抑制剂中，添加 TFR 处理抑制土壤表观硝化率作用较弱，0.5% TFR 在第 31~74 d (4 月 25 日—6 月 7 日) 期间的表观硝化率与单施尿素无差异，没有体现抑制硝化的作用。各处理的表观硝化率随取样时间的延续呈现出一致的上升趋势，大多都在第 74 d 超过 90%，而 TFR 的 3 个浓度梯度均在第 63 d 就超过 90%。

DCD 和 THU 在 3 个用量下的处理及 SCU 处理都能够有效地降低表观硝化率。同一时期、同一用量下，3 种抑制剂的表观硝化率排序为 DCD<THU<TFR，即 DCD 抑制硝化作用为三者中最强，THU 次之，TFR 最弱。在第 17、31 d，2% DCD 抑制作用最强，表观硝化率均为两时期最小值 (24.5% 和 28.2%)。但到后期第 47、63、74 d，SCU 的表观硝化率均为最低水平 (61.6%、80.2% 和 92.8%)，表明 SCU 能更持续稳定

表 2 不同硝化抑制剂处理土壤表观硝化率的方差分析

Table 2 Analysis of variance (ANOVA) of soil apparent nitrification rate under different inhibitors

因子 Factor	df	MS	F	P
抑制剂 Inhibitor	2	0.379	277.080	<0.001***
浓度 Concentration	2	0.088	64.174	<0.001***
采样日期 Date of sampling	4	2.221	1 622.291	<0.001***
抑制剂×浓度 Inhibitor×concentration	4	0.001	0.736	0.569
抑制剂×采样日期 Inhibitor×date of sampling	8	0.063	45.755	<0.001***
浓度和采样日期 Concentration×date of sampling	8	0.009	6.638	<0.001***
抑制剂×浓度×采样日期 Inhibitor×concentration×date of sampling	16	0.001	0.500	0.944
误差 Error	135	0.001		

表 3 不同处理土壤表观硝化率动态变化(%)
Table 3 Dynamics of soil apparent nitrification rate under different treatments(%)

处理 Treatment	不同时期土壤表观硝化率 Apparent nitrification rate of soil in different periods/%				
	2013 年 4 月 11 日	2013 年 4 月 25 日	2013 年 5 月 11 日	2013 年 5 月 27 日	2013 年 6 月 17 日
DCD/GR1	34.4±2.5def	39.6±1.6g	78.8±2.6cde	83.8±1.8d	97.6±0.6a
THU/GR1	37.9±1.8de	64.4±2.3de	85.5±2.4abc	89.1±1.5c	97.2±0.2abc
TFR/GR1	55.0±3.7b	78.6±2.4a	92.1±1.6a	95.7±0.8a	96.8±0.4abc
DCD/GR2	30.9±5.2fg	37.5±4.7g	75.5±4.2def	82.7±0.7de	97.5±0.4a
THU/GR2	32.7±3.0efg	59.6±3.5e	80.4±3.3cde	88.4±1.0c	96.8±1.0abc
TFR/GR2	49.2±2.4c	70.4±4.8bcd	85.4±3.6abc	94.9±0.6a	96.1±1.3c
DCD/GR3	24.5±5.0h	28.2±4.0h	68.6±6.9fg	79.4±2.0f	97.7±0.4a
THU/GR3	27.7±4.2gh	50.5±5.8f	73.7±14.9ef	84.2±1.4d	97.3±0.5abc
TFR/GR3	39.8±3.8d	67.7±5.1cd	83.1±1.6bcd	92.5±0.5b	97.4±0.4ab
SCU	46.9±4.8c	51.3±5.9f	61.6±3.2g	80.2±2.6f	92.8±1.3d
urea	59.4±1.5b	73.9±1.3ab	88.1±2.2ab	94.1±0.9ab	96.3±1.1bc
CK	77.9±4.7a	73.6±5.6abc	70.7±1.2f	81.5±2.9ef	94.1±1.7d

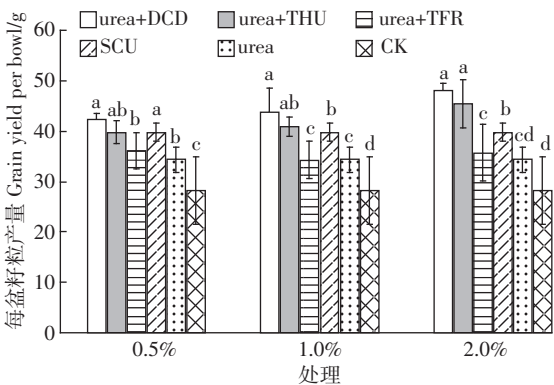
注:GR1、GR2、GR3 指对应硝化抑制剂添加量为尿素用量的 0.5%、1%、2%,表中数据为 5 次重复的平均值及标准方差,同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

地发挥抑制硝化作用。

2.3 对小麦籽粒产量的影响

由图 2 可知,单施尿素及其他氮素添加模式,都显著高于 CK($P<0.05$),小麦产量平均提高 40%以上。与单施尿素相比,尿素+DCD 模式,显著提高了小麦产量,且在 0.5%、1%、2%添加浓度,都达到显著水平($P<0.05$)。

THU 作用仅次于 DCD,在 1.0%和 2.0%添加浓度,都显著高于单施尿素产量;但在 0.5%添加水平,与单施尿素相比,增产作用并不显著($P>0.05$)。添加 TFR 方式在不同添加浓度,与单施尿素相比,都没有达到显著水平($P>0.05$)。SCU 增产效果与 THU 和 DCE 类似,但低于添加硝化抑制剂 2%浓度时的增产效果。



图中数据为 5 次重复的平均值及标准方差,不同小写字母表示同一浓度下不同硝化抑制剂间差异显著($P<0.05$)

图 2 不同处理小麦籽粒产量

Figure 2 Grain yield of wheat under different treatments

3 讨论

3.1 单施尿素和不施氮土壤氮转化特征

试验期间,单施尿素和对照不施氮土壤的表观硝化率分别处于 59.4%~96.3%之间和 70.7%~94.1%之间(表 3)。只在取样的第一个时间点(追肥后第 17 d),单施尿素表观硝化率低于对照土壤,在后期的采样时间点,单施尿素表观硝化率均显著高于对照土壤。对照的土壤表观硝化率与其他文献报道的不施氮土壤表观硝化率 72%~99%相近^[10]。尿素处理土壤在初期表观硝化率反而比对照低,可能是第一次取样时土壤 NO₃-N 释放高峰尚未出现,而土壤此时又有较高土壤无机氮总量,导致表观硝化率反而比较低,有文献认为尿素处理的 NO₃-N 释放高峰一般出现在 20 d 前后^[17]。本研究尿素处理的 NO₃-N 高峰期为追肥后第 31 d,NO₃-N 浓度达到 95 mg·kg⁻¹,而同期的对照土壤 NO₃-N 含量仅为 12 mg·kg⁻¹(图 1)。

3.2 硝化抑制剂不同浓度对土壤氮转化的影响

许多研究证明硝化抑制剂可有效抑制 NH₄⁺-N 向 NO₃⁻-N 的硝化,减少氮素损失^[19-20]。将硝化抑制剂与尿素配施,可以延长土壤中无机氮以 NH₄⁺-N 形态存在的时间,降低土壤 NO₃⁻-N 浓度,推迟 NO₃⁻-N 浓度峰值出现的时间^[20]。DCD 作为一种最常见的硝化抑制剂,其作用已被许多研究证实^[21-25]。以常用的双氰胺(DCD)为对比组,比较对应用量下硫脲 THU 和硫脲甲醛树脂 TFR 的硝化抑制作用,可以为筛选不同氮

素增效提供参考。目前,关于硫脲 THU 作为硝化抑制剂的已有报道,THU 首先在日本被广泛用作硝化抑制剂。有研究发现硫脲在 0.1% 的用量下就有抑制作用,但用量 0.3%~1.0% 之间差异不显著,用量 1.0%~5.0% 之间抑制效果随用量增加而显著加强^[24-26],这一点与本试验研究结果相符,硝化抑制剂添加浓度对土壤表观硝化率有显著影响 ($F=64.17, P<0.001$, 表 2); 当抑制剂用量为 1% 时, TFR 的 NH_4^+-N 浓度在第 17 d 稍高于单施尿素, 差异显著 ($P<0.05$), 但第 31 d 后, 与单施尿素无差异, 表明 TFR 在该用量下能够提高土壤 NH_4^+-N 含量, 但作用较弱。DCD 和 THU 处理土壤 NH_4^+-N 含量显著高于单施尿素, 且 DCD 显著高于 THU, 二者在 1% 用量处理下的 NH_4^+-N 浓度明显高于 0.5% 的用量处理。各硝化抑制剂均在 2% 浓度下取得最好的硝化抑制作用(表 3)。

各处理的表观硝化率随时间的推迟都呈现出一致的上升趋势, 大多都在第 74 d 超过 90%, 而 TFR 的 3 个浓度梯度的处理均都在第 63 d 就超过 90%。这也表明 TFR 的抑制作用持续时间较短, 不是理想的硝化抑制剂。

3.3 硝化抑制剂和包硫尿素抑制土壤硝化作用的比较

SCU 表现出良好的抑制硝化的作用, 特别在追肥中后期(第 63 d 和第 74 d)土壤表观硝化率显著低于其他处理 ($P<0.05$)。SCU 通过硫膜上的微孔和裂隙实现缓释, 尿素缓慢水解成 NH_4^+ 并在膜内外形成浓度梯度, 进入土壤后再进一步硝化成 NO_3^--N , 因此土壤 NO_3^--N 不会迅速增加; 而硝化抑制剂由于植物吸收或其他损失, 在土壤中的有效浓度逐渐降低, 随施用时间延长, 硝化抑制作用下降显著; SCU 由于有包膜材料的保护, 表现对氮素控释的长效性。有研究表明, 包膜硫材料对土壤氮素的转化也有一定的影响, 当涂硫量由 16% 增加到 18% 和 22% 时, 30 d 的氮素释放率由 60.5% 降到 16.6% 和 7.89%; 养分累积释放量达到 80% 的养分释放期由 60 d 延长到 120 d 和 180 d, 相当于养分释放期增加了 2 倍和 3 倍以上^[27]。涂硫量的很小增加带来氮素释放期的显著延长, 包膜的厚度和完整性对养分释放起关键作用; 也有学者认为硫磺在土壤中的氧化主要以生物学过程为主, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 和 $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ 是硫在土壤循环过程中的重要中间产物, 本身具有很强的硝化抑制作用和尿素水解抑制作用, 施用 S 肥有利于产量的提高和施用过量 N 肥时的肥效发挥^[28]; 氮硫之间直接的稳定化学计量关系, 也可能是影响氮素转化的关键因素^[29]。

4 结论

不同硝化抑制剂类型和不同添加浓度土壤表观硝化率都存在显著性差异 ($P<0.001$); 其中, 硫脲 THU 抑制土壤硝化的作用效果与双氰胺 DCD 的效果更为接近, 且随剂量的增加作用强度和持续时间表现出较一致的变化规律, 是一种良好的氮素增效剂; 硫脲甲醛树脂 TFR 抑制强度弱, 与尿素直接混配, 不能显著提高氮素的利用效率。

本试验使用的包硫尿素从作用延续时间和抑制硝化作用的强度来看, 追肥后 74 d 土壤 NO_3^--N 水平和表观硝化率仍显著低于其他处理 ($P<0.05$, 表 3), 包膜肥料比其他基于调节微生物活性的添加氮素增效剂方式体现更好的 N 素控释作用。硝化抑制剂和包膜材料的融合应用, 可能作为今后缓控释肥开发的途径; 但外源添加物长期应用可能对土壤环境造成潜在的危害, 因此有关硝化抑制剂在土壤中的形态归趋和长期作用还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
ZHU Zhao-liang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783. (in Chinese)
- [2] Liu Xue-jun, Zhang Ying, Han Wen-xuan, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [3] Tilman D, Balzer C, Hill J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. *PNAS*, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [4] 俞巧钢, 陈英旭. 尿素添加硝化抑制剂 DMPP 对稻田土壤不同形态矿质态氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1357-1363.
YU Qiao-gang, CHEN Ying-xu. Effect of the urea with nitrification inhibitor DMPP addition on different form nitrogen transformation in rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1357-1363. (in Chinese)
- [5] 李香兰, 马 静, 徐 华, 等. 不同施用时间对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3675-3681.
LI Xiang-lan, MA Jing, XU Hua, et al. Effect of different application time of DCD on methane and nitrous oxide emissions during rice growth period[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3675-3681. (in Chinese)
- [6] Emami S, Pourbabaie A A, Alikhani H A. Interactive effect of nitrogen fertilizer and hydrocarbon pollution on soil biological indicators[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(9): 3513-3519.
- [7] Gu B, Ju X, Chang J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China[J]. *PNAS*, 2015, 112(28): 8792-8797.
- [8] 侯彦林, 赵慧明, 李红英. 中国农田氮肥面源污染估算方法及其实证 III: 估算模型的实证 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1337-1340.
HOU Yan-lin, ZHAO Hui-ming, LI Hong-ying. Estimation and

- demonstration of nitrogen non-point pollution in China Ⅲ: Demonstration of the model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7):1337-1340. (in Chinese)
- [9] Azeem B, Kusaari K, Man Z. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer[J]. *Journal of Controlled Release*, 2014, 181(1):11-21.
- [10] 宁建凤, 崔理华, 艾绍英, 等. 两种硝化抑制剂对土壤氮转化的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):144-151.
NING Jian-feng, CUI Li-hua, AI Shao-ying, et al. Effects of two nitrification inhibitors on transformations of nitrogen in soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4):144-151. (in Chinese)
- [11] 解玉洪, 李曰鹏. 国外缓控释肥产业化研究进展与前景[J]. 磷肥与复肥, 2009, 24(4):91-93, 96.
XIE Yu-hong, LI Yue-peng. Research progress and prospects of foreign slow/controlled release fertilizer industry[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2009, 24(4):91-93, 96. (in Chinese)
- [12] 张坤, 徐静, 张民. PPC/PBS包膜尿素膜材料降解特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3):624-631.
ZHANG Kun, XU Jing, ZHANG Min. Degradation behavior of PPC/PBS as urea coating in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(3):624-631. (in Chinese)
- [13] Di H, Cameron K. Nitrate leaching losses and pasture yields as affected by different rates of animal urine nitrogen returns and application of a nitrification inhibitor—a lysimeter study[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79(3):281-290.
- [14] Soares J, Cantarella H, Menegale M. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 52:82.
- [15] 戴宇, 贺纪正, 沈菊培. 双氰胺在农业生态系统中的应用效果及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1):279-286.
DAI Yu, HE Ji-zheng, SHENG Ju-pei. Effects and influence factors of dicyandiamide (DCD) application in agricultural ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1):279-286. (in Chinese)
- [16] 焦晓光, 梁文举, 陈利军, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤有效态氮、微生物量氮和小麦氮吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10):1903-1906.
JIAO Xiao-guang, LIANG Wen-ju, CHEN Li-jun, et al. Effects of urease/nitrification inhibitors on soil available N and microbial biomass N and on N uptake of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10):1903-1906. (in Chinese)
- [17] 史云峰, 武志杰, 陈利军, 等. 3, 5-二甲基吡唑磷酸盐(DMPZP)对土壤硝化作用的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5):1033-1037.
SHI Yun-feng, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al. Effects of 3, 5-dimethylpyrazole phosphate (DMPZP) on soil nitrification[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5):1033-1037. (in Chinese)
- [18] 潘复燕, 薛利红, 卢萍, 等. 不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5):928-936.
PAN Fu-yan, XUE Li-hong, LU Ping, et al. Effects of different soil additives on wheat yield and nitrogen and phosphorus loss in Tai Lake region [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):928-936. (in Chinese)
- [19] 陈序根, 徐卫红, 王崇力, 等. 脲酶硝化双抑制剂缓释肥提高番茄产量及NPK养分吸收[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21):168-176.
CHEN Xu-gen, XU Wei-hong, WANG Chong-li, et al. Slow-release fertilizer containing urease inhibitor and nitrification inhibitor improving nitrogen release characteristic and uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium in tomato[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21):168-176. (in Chinese)
- [20] 刘瑜, 串丽敏, 安志装, 等. 硝化抑制剂双氰胺对褐土中尿素转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):2496-2502.
LIU Yu, CHUAN Li-min, AN Zhi-zhuang, et al. Effects of nitrification inhibitor dicyandiamide on ammonium and nitrate nitrogen transformations in cinnamon soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2496-2502. (in Chinese)
- [21] Migliorati M D A, Scheer C, Grace P R, et al. Influence of different nitrogen rates and DMPP nitrification inhibitor on annual N_2O emissions from a subtropical wheat-maize cropping system.[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2014, 186:33-34.
- [22] Di H J, Cameron K C, Podolyan A, et al. Effect of soil moisture status and a nitrification inhibitor, dicyandiamide, on ammonia oxidizer and denitrifier growth and nitrous oxide emissions in a grassland soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 73:59-68.
- [23] Scheer C, Rowlings D W, Firrel M, et al. Impact of nitrification inhibitor (DMPP) on soil nitrous oxide emissions from an intensive broccoli production system in sub-tropical Australia[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 77:243-251.
- [24] 纪洋, 余佳, 马静, 等. DCD不同施用时间对小麦生长期 N_2O 排放的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23):7151-7160.
JI Yang, YU Jia, MA Jing, et al. Effect of timing of DCD application on nitrous oxide emission during wheat growing period[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23):7151-7160. (in Chinese)
- [25] 杨扬, 孟德龙, 秦红灵, 等. 硝化抑制剂对蔬菜土硝化和反硝化细菌的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(21):6803-6810.
YANG Yang, MENG De-long, QING Hong-lin, et al. Mechanism of nitrification inhibitor on nitrogen-transformation bacteria in vegetable soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21):6803-6810. (in Chinese)
- [26] Kim D G, Giltrap D L, Saggar S, et al. Field studies assessing the effect of dicyandiamide (DCD) on N transformations, pasture yields, N_2O emissions and N-leaching in the Manawatu region[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2014, 57(4):271-293.
- [27] 杨超越, 张民, 陈剑秋, 等. 聚合物硫包尿素的养分释放特征[J]. 化肥工业, 2006, 33(1):26-30.
YANG Yue-chao, ZHANG Min, CHEN Jian-qiu, et al. Nutrient release characteristics of polymer-sulphur coated urea[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2006, 33(1):26-30. (in Chinese)
- [28] 孟赐福, 姜培坤, 曹志洪, 等. 硫素与其他营养元素的交互作用对作物养分吸收、产量和质量的影响[J]. 土壤, 2009, 41(3):329-334.
MENG Ci-fu, JIANG Pei-kun, CAO Zhi-hong, et al. Interaction effects of sulfur and other nutrients on nutrient uptakes, yields, and qualities of crops[J]. *Soils*, 2009, 41(3):329-334. (in Chinese)
- [29] Xu X, Hui D, King A, et al. Convergence of microbial assimilations of soil carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur in terrestrial ecosystems [J]. *Scientific Reports*, 2015(5):1-8.