

DOI: 10.11766/trxb202012010592

漆增连, 贺明荣, 代兴龙, 董元杰. 天然橡胶与生化抑制剂联合包膜控释尿素对土壤供氮及冬小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (5): 1408–1419.

QI Zenglian, HE Mingrong, DAI Xinglong, DONG Yuanjie. The Effect of Controlled Release of Urea Coated with Natural Rubber and Biochemical Inhibitor on Soil Nitrogen Supply and Winter Wheat Growth [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (5): 1408–1419.

天然橡胶与生化抑制剂联合包膜控释尿素对土壤供氮及冬小麦生长的影响*

漆增连¹, 贺明荣², 代兴龙², 董元杰^{1†}

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; 2. 山东农业大学农学院, 山东泰安 271018)

摘要: 通过控制氮素的溶解与转化速率使其与小麦的需求相匹配, 可提高施肥效益, 实现小麦高产稳产和减轻环境污染。以天然橡胶为包膜材料与生化抑制剂涂层尿素联合包膜, 制备了天然橡胶包膜尿素 (CRU1)、正丁基硫代磷酸三胺 (NBPT) 涂层+天然橡胶包膜尿素 (CRU2)、3, 4-二甲基吡唑啉磷酸盐 (DMPP) 涂层+天然橡胶包膜尿素 (CRU3)、NBPT+DMPP 组合涂层+天然橡胶包膜尿素 (CRU4) 四种新型控释尿素。采用扫描电镜、25℃静水释放和土壤培养试验探讨了自制双控释尿素的微观结构、控释性能及 NBPT 和 DMPP 控制氮素转化效果, 并通过田间试验, 验证了四种控释尿素对土壤供氮能力及冬小麦生长的影响。结果表明, 天然橡胶作为膜材料制备控释肥, 成膜性好, 剖面养分通道明显。25℃静水条件下, 天然橡胶包膜控释肥控释期达 60 d。与普通尿素 (U) 处理相比, 各控释肥均能显著降低土壤氨气挥发速率, 推后氨挥发峰值天数。与 U 相比, CRU1、CRU2、CRU3、CRU4 在减氮 10%条件下依然能显著提高土壤持续供氮能力, 提高小麦产量。CRU4 在降低冬小麦生育期内土壤脲酶活性、抑制土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化及减少土壤氨挥发等方面较单独添加 NBPT 和 DMPP 更优。与 U 相比, CRU1、CRU2、CRU3、CRU4 冬小麦分别增产 16.96%、21.46%、17.37%和 25.90%。CRU4 土壤氮素持续供应能力最强, 冬小麦增产幅度最大, 这表明将天然橡胶与抑制剂涂层尿素联合包膜制备的双控释尿素既能“控溶”又能“控转”, 在氮素减施 10%条件下, 能够实现小麦高产、稳产。

关键词: 控释肥; 天然橡胶; 脲酶抑制剂; 硝化抑制剂; 土壤氮; 小麦产量

中图分类号: S143.1; S512.1^{†1} 文献标志码: A

The Effect of Controlled Release of Urea Coated with Natural Rubber and Biochemical Inhibitor on Soil Nitrogen Supply and Winter Wheat Growth

QI Zenglian¹, HE Mingrong², DAI Xinglong², DONG Yuanjie¹

(1. College of Resources and Environment Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Agronomy College, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

* 国家重点研发计划项目 (2017YFD0201705) 和山东省农业重大应用技术创新项目 (SD2019ZZ021) 共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2017YFD0201705), the Major Agricultural Application Technology Innovation Projects of Shandong Province of China (No. SD2019ZZ021)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yuanjiedong@163.com

作者简介: 漆增连 (1995—), 男, 甘肃临洮人, 硕士研究生, 主要从事新型肥料研制与应用方面的研究。E-mail: 2357902354@qq.com

收稿日期: 2020-12-01; 收到修改稿日期: 2021-03-18; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-06-29

Abstract: 【Objective】 The purposes of this research were to (i) reduce or slow down the release and conversion rate of nitrogen, (ii) increase the utilization rate of nitrogen, (iii) increase the yield of wheat, and (iv) reduce environmental pollution. 【Method】 We applied the coating technology and inhibitor addition technology at the same time to prepare a new type of dual controlled release urea. For preparation, the coating material of the controlled release fertilizer was natural rubber while the inhibitors used were urease inhibitor (NBPT, n-butyl thiophosphoric triamide) and nitrification inhibitor (DMPP, 3, 4-dimethylpyrazole phosphate). According to the different inhibitors added, four kinds of new natural rubber coated urea were prepared: uncoated (CRU1), NBPT coating (CRU2), DMPP coating (CRU3), and (NBPT+DMPP) combined coating (CRU4). The microstructure of natural rubber coated urea was observed by a scanning electron microscope (SEM). The slow-release characteristics of urea nitrogen were determined using a hydrostatic release test. The effects of NBPT and DMPP in controlling nitrogen conversion were determined by soil culture test. Also, we designed field experiments to verify the effects of the four controlled-release urea on soil nitrogen supply and winter wheat growth. 【Result】 Natural rubber was used as a membrane material to prepare controlled-release fertilizers, with good film-forming properties, smooth surface and obvious nutrient channels in the profile. When loaded in still water, the controlled release period of natural rubber coated controlled-release fertilizer reached 60 days. Compared with urea (U) treatment, all controlled-release fertilizers significantly reduced the ammonia volatilization rate in the soil and postponed the peak ammonia volatilization days. Also, CRU1, CRU2, CRU3, and CRU4 significantly increased the continuous nitrogen supply capacity of the soil and increased the yield of wheat under 10% nitrogen reduction relative to U treatment. CRU4 was better than adding NBPT and DMPP alone in reducing soil urease activity during the growth period of winter wheat, inhibiting the conversion of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ to $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and reducing soil ammonia volatilization. Relative to U treatment, winter wheat production of CRU1, CRU2, CRU3, and CRU4 increased by 16.96%, 21.46%, 17.37% and 25.90%, respectively. 【Conclusion】 CRU4 demonstrated the strongest continuous nitrogen supply capacity when applied in soil and the best increase in winter wheat yield. This result indicates that the new controlled-release urea prepared by combining natural rubber and inhibitor-coated urea controlled the dissolution of urea and delayed the urea conversion process. Under the condition of a 10% reduction in nitrogen application rate, the yield of winter wheat can still be significantly increased.

Key words: Controlled release fertilizer; Natural rubber; Urease inhibitor; Nitrification inhibitor; Soil nitrogen; Wheat yield

氮素作为植物生长发育所必需的营养元素之一，既是植物体重要的组成元素^[1]，也会对农产品产量和品质产生重要影响^[2]。土壤含氮量低，仅凭土壤氮素供应无法满足作物生长需求，因此施用氮肥是保障作物产量和粮食安全的重要措施^[3-4]。目前，农业生产中大量施用的普通尿素，因其养分释放过快、肥效持续时间短，容易造成土壤养分供应与作物需求不同步，导致作物生育前期养分过剩及生育后期脱肥^[5]。过量及不合理的施肥方式，不但造成资源浪费，也带来土壤污染、地下水污染、植株病害及农产品品质下降等问题^[6]。从植物营养学的角度出发，最优的施肥方式是根据作物需肥规律及土壤供肥能力，适时适量地补充作物生长所需营养元素，控释肥的出现为实现肥料养分释放与作物养分需求相匹配提供了载体^[5-8]。

控释肥的种类繁多，目前发展较快、在生产中应用较广的缓/控释肥料主要有包膜型缓/控释肥料

和稳定性肥料^[9]。以有机高分子材料为主的包膜控释肥，克服了尿素在土壤中溶解过快的问题^[10]，但无法控制尿素溶出后的水解转化，同时膜壳在土壤中降解周期长、包膜成本高、包膜难度大等因素限制其进一步发展^[11]。研究表明，脲酶抑制剂和硝化抑制剂的施用能延缓土壤中尿素的水解及铵态氮至硝态氮的转化过程^[12]，可降低土壤 NH_3 挥发速率和硝酸盐的淋失，使土壤剖面硝态氮含量降低 20%~70%^[13]，可有效降低地下水的污染风险^[14]，有效提高氮肥利用率。但是施入土壤的脲酶抑制剂和硝化抑制剂存在吸附固定、降解等问题^[15-16]，限制其作用时效，使其抑制效能显著降低。因而，研制既能控制尿素溶出，又能延缓尿素水解且环境安全的新颖双控释尿素显得尤为重要。

本实验室的前期研究^[17-18]表明，将有机高分子（树脂）或无机膜材料（微晶化磷矿粉）与脲酶/硝化抑制剂联合包膜制备的缓/控释尿素具有较好的

控释性能,可提高氮素利用效率、增加作物产量。但是,用树脂为膜材料的控释肥养分释放后,膜材料难以降解,对土壤有不利影响,而无机膜材料由于控释性能较差,不能满足小麦等生育期植物一次性施肥的需求。为此,本文在前期试验^[18-19]的基础上,采用天然植物源材料(天然橡胶,主要成分为顺-1,4-聚异戊二烯)作包膜材料与脲酶抑制剂(NBPT,正丁基硫代磷酸三胺)和硝化抑制剂(DMPP,3,4-二甲基吡唑磷酸盐)涂层尿素联合包膜的技术手段,制备“控溶”与“控转”兼具的双控释尿素。因抑制剂与天然橡胶共包膜,有利于同时控制尿素与抑制剂的溶出,进而延长抑制剂的持效期,减缓尿素水解速率和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化速率,实现对尿素溶解与转化的双重调控。同时,由于包膜材料选用的天然橡胶,是一种综合性能优越的可再生资源 and 绿色资源,环保优势明显,既有利于减轻常规树脂膜壳对土壤环境的压力,又能弥补无机包膜材料控释期短的不足。本研究通过扫描电镜试验与25℃静水释放试验对自制控释尿素进行微观结构及控释期评价,探讨新型控释尿素的控释机理;采用室内培养试验及田间小麦试验,研究双控释尿素对土壤 NH_3 挥发、土壤供氮能力及冬小麦产量的影响,明确新型双控尿素的增效潜力与机制,可为促进缓/控释肥的发展及合理施用氮肥提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 可降解包膜材料与抑制剂结合型双控释尿素的制备

将用量为纯氮质量0.25%的NBPT与一定量的75%乙醇溶液混匀,水浴加热至85℃,待其充分溶解后装入手动喷壶。将直径2~4 mm大颗粒尿素装入包衣锅中,设置转速为40 r·min⁻¹,供风加热使系统温度保持在85℃左右,流化抛光5 min,用手动喷壶将NBPT-乙醇溶液均匀喷涂至流化尿素表面,干燥得到NBPT涂层尿素(U+NBPT)。将用量为纯氮质量0.5%的DMPP与一定量的75%乙醇溶液混匀,其余参数同上,制备DMPP涂层尿素(U+DMPP)。将用量为纯氮质量0.25%的NBPT和0.5%DMPP与一定量的75%乙醇溶液混匀,其余参

数同上,制备NBPT+DMPP涂层尿素(U+NBPT+DMPP)。

将天然橡胶与石蜡按10:1混匀,熔融后制成混合包膜液。分别将普通大颗粒尿素(U)、U+NBPT、U+DMPP、U+NBPT+DMPP四种尿素装入包衣锅中,设置转速为40 r·min⁻¹,供风加热使系统温度保持在85℃左右,将尿素质量5%的混合包膜液分五次(每次间隔5~8 min)均匀喷涂至上述四种尿素表面,使包膜液在流化的尿素表面均匀铺展成膜,加入少量微晶化磷矿粉,防止因有机高分子相互作用产生静电而相黏连。最终制备天然橡胶包膜尿素(CRU1)、NBPT涂层+天然橡胶包膜尿素(CRU2)、DMPP涂层+天然橡胶包膜尿素(CRU3)、NBPT+DMPP涂层+天然橡胶包膜尿素(CRU4)四种新型控释尿素。

制备的四种新型控释尿素中膜材料占肥料总质量的4.8%;CRU1、CRU2、CRU3和CRU4中N含量均为430 g·kg⁻¹;CRU2中NBPT含量为1.03 g·kg⁻¹;CRU3中DMPP含量为2.06 g·kg⁻¹;CRU4中NBPT和DMPP含量分别为1.03 g·kg⁻¹和2.06 g·kg⁻¹。

1.2 田间试验

冬小麦田间小区试验于2019年10月至2020年6月在山东省潍坊市农业科学院实验基地进行,试验区土壤类型为棕壤,质地为黏壤土。耕层土壤基本理化性质:土壤pH 7.17,有机质13.41 g·kg⁻¹,全氮1.33 g·kg⁻¹,有效氮61.59 mg·kg⁻¹,有效磷18.87 mg·kg⁻¹,速效钾146.7 mg·kg⁻¹。供试作物为冬小麦(*Triticum aestivum* L.),品种为“济麦22”。

试验共设7个处理:1)不施氮肥(CK);2)普通尿素(U);3)树脂包膜尿素(CRU0),由土肥资源高效利用国家工程实验室提供;4)CRU1;5)CRU2;6)CRU3;7)CRU4。试验小区面积为30 m²(3 m×10 m),小麦播种量为207 kg·hm⁻²,2019年10月16日播种,2020年6月14日收获。每个处理重复三次,随机区组排列。

施肥量及施肥方式:除普通尿素处理N-P₂O₅-K₂O:240-105-105 kg·hm⁻²外,其余处理均为N-P₂O₅-K₂O:216-105-105 kg·hm⁻²(氮素减施10%);普通尿素处理基施50%,拔节期追施50%;控释尿素处理普通尿素与控释尿素3:7掺混一次性施入。磷、

钾肥一次性基施。

1.3 控释肥性能测定

采用扫描电镜 (JSM-6610LV, 日本) 对样品的微观外貌及剖面进行扫描拍照, 分析天然橡胶包膜控释肥微观结构; 按国家标准 GB/T 23348-2009^[20] 采用 25℃ 静水溶出率法测定天然橡胶包膜控释肥的养分释放率, 氮采用凯氏定氮法^[18] 测定; 采用室内土壤培养法测定双控释尿素氮挥发速率及氮挥发积累量^[12]。

1.4 田间样品采集与测定

于冬小麦苗期、越冬期、开花期、成熟期采集耕层土壤样品, 成熟期测定小麦产量及产量构成因素。小麦成熟期产量测定: 小麦成熟期按常规方法取样, 将小麦植株置于 105℃ 烘箱中杀青 1 h, 然后置于 80℃ 烘干至恒重, 称重并计算干物质积累量; 在各小区内选取长势均匀的区域, 划定 1 m×6 行 (共计 1.5 m², 包含一个边行) 的面积调查穗数, 然后全部由人工收割、脱粒, 风干后称重, 利用谷物水分测定仪 (PM-8188-A, 中国) 测定籽粒含水量, 调整含水率至 12%, 用于籽粒千粒重的测定; 在长势均匀的区域随机取 30 个穗, 用于每穗穗粒数的调查。土壤样品的测定: 土壤脲酶活性的测定采用苯

酚钠-次氯酸钠比色法测定, 以 24 h 每克土壤中产生的 NH₃-N 的毫克数表示^[21]; 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量采用 1 mol·L⁻¹ 的 KCL 浸提, 全自动流动分析仪 (AA3, 德国) 测定。

1.5 数据处理

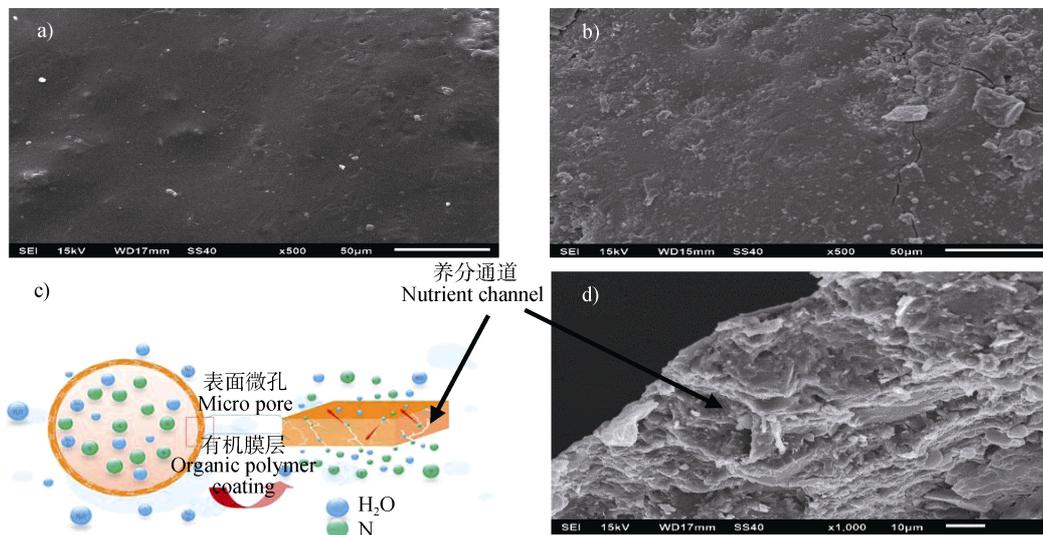
氮肥农学效率 NFAE/(kg·kg⁻¹) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量; 氮肥偏生产力 NPFP/(kg·kg⁻¹) = 籽粒产量 / 施氮量; 氮素吸收效率 NUPE/% = 地上部氮素积累量 / 供氮量 × 100; 氮肥回收效率 NR/% = 肥料氮吸收量 (kg·hm⁻²) / 施氮量 (kg·hm⁻²) × 100。

试验数据采用 Excel 2016 和 Origin 2018 进行处理与绘图, 采用 SPSS 21 软件进行统计分析, 采用邓肯 (Duncan) 法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结 果

2.1 天然橡胶包膜控释肥微观结构和养分释放特征

对树脂包膜肥料 (图 1a) 与天然橡胶包膜肥料 (图 1b) 在相同放大条件 (×500) 表面电镜照片进行观察发现, 树脂包膜材料能完整地覆盖在肥芯表面, 膜壳表面光滑致密, 未见明显孔隙。而天然橡



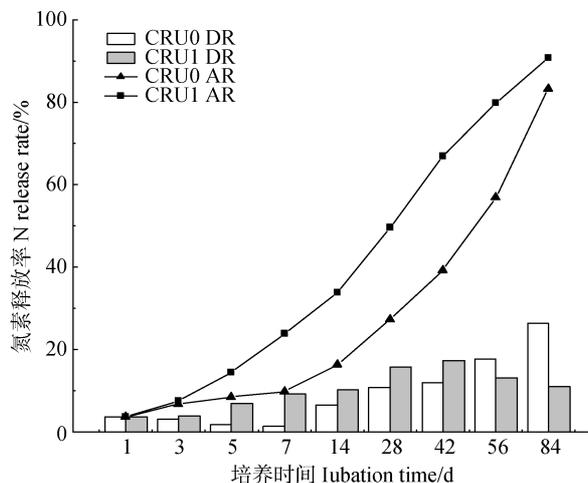
注: a): 树脂包膜肥料表面电镜照片 ×500; b): 天然橡胶包膜肥料表面电镜照片 ×500; c): 包膜控释肥养分释放示意图; d): 天然橡胶包膜肥料剖面结构照片 ×1 000。Note: a): Electron micrograph of resin-coated fertilizer surface ×500; b): Electron micrograph of the surface of natural rubber coated fertilizer ×500; c): Schematic diagram of the nutrient release of coated controlled-release fertilizer; d): Sectional structure photo of natural rubber coated fertilizer ×1 000.

图 1 包膜肥料电镜照片及示意图

Fig. 1 Electron micrograph and schematic diagram of coated fertilizer

胶作为包膜材料,受到包膜工艺等的影响,在相同放大倍数下,成膜性较树脂材料略有差异,表面有微小凸起,孔隙密度适中。将天然橡胶包膜尿素剖面(图1d)放大($\times 1\ 000$)可以发现,其膜壳剖面存在少量崎岖的通道,这可能是肥料养分释放的主要途径。这表明施入土壤中的肥料颗粒,土壤中的水气通过渗透作用进入膜壳内部,溶解肥料核芯,膜内外浓度差升高,使得膜壳微观结构发生改变,养分通道密度增大,最后通过养分通道释放养分,养分通道越少、崎岖程度越大,控释期越长。

控释尿素氮素释放特征是评价其应用性能的关键。由图2可知,CRU0和CRU1的氮素释放速率及氮素累积释放量均符合GB/T 23348-2009^[20]对控释肥养分释放的规定。CRU0和CRU1氮素均能缓慢释放,但两者氮素释放曲线略有差异。CRU0氮素累积释放曲线在1~7d内有明显停滞期,该时段内氮素累积释放8.46%;7~84d氮素加速释放,该时段内氮素累积释放73.45%,培养时间内氮素累积释放83.20%。CRU1氮素累积释放曲线在1~3d内有短暂停滞期,氮素释放7.47%;在3~42d氮素累积释放曲线加速上升,该时段内氮素累积释放59.38%;42~84d为养分释放衰减期,该时段氮素



注: DR—浸提时段释放速率; AR—累积释放率; CRU0—环氧树脂包膜控释肥; CRU1—天然橡胶包膜控释肥。Note: DR—N release rate at different extracting time intervals; AR—Accumulated N release rate; CRU0—Epoxy resin coated controlled-release fertilizer; CRU1—Natural rubber coated controlled-release fertilizer.

图2 控释尿素氮释放特征

Fig. 2 Nitrogen release characteristics of controlled-release urea

累积释放24.0%,培养时间内氮素累积释放90.85%。培养时间内,第1~42天,CRU0氮素释放速率均小于CRU1,第42~84天,CRU0氮素释放速率大于CRU1氮素释放速率,表明与普通树脂包膜控释肥相比,天然橡胶包膜控释肥控制养分释放能力略差,这与扫描电镜(图1)及田间冬小麦试验结果一致。天然橡胶包膜控释尿素在25℃静水条件下控释期可达60d左右,有效阻止尿素溶出,实现对普通尿素“控溶”。

2.2 双控释尿素对土壤氨挥发速率及氨挥发积累量的影响

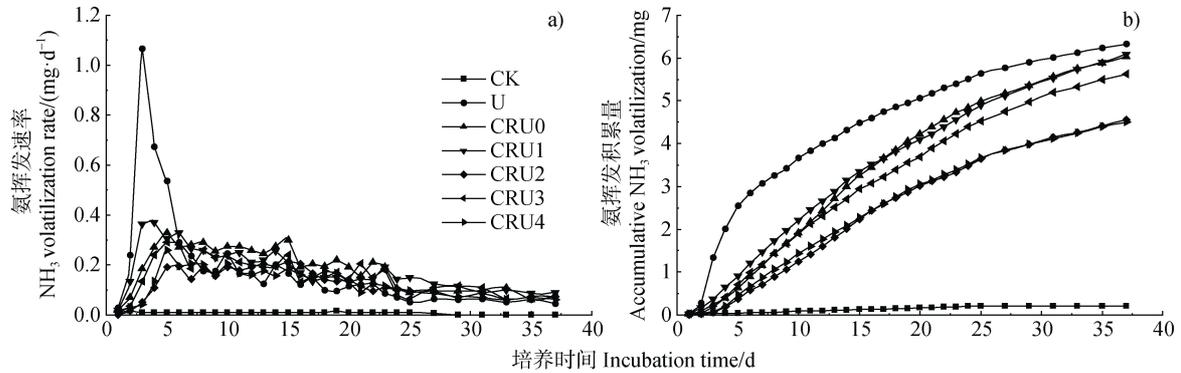
由图3a可见,CK土壤 NH_3 挥发速率较为平稳,无较大波动,表明土壤本身供氮能力有限。U处理 NH_3 挥发速率表现为先升高后降低,最后趋于平稳,于第3天达到峰值。与U处理相比,培养前期各控释肥处理土壤 NH_3 挥发速率均显著降低,培养后期 NH_3 挥发速率变化平稳。与U处理相比,CRU0、CRU1、CRU2和CRU4可降低土壤 NH_3 挥发速率峰值平均达73%~78% ($P < 0.05$),峰值由大到小依次为CRU0、CRU1、CRU2、CRU4,峰值出现时间向后推移6~18d。与CRU0相比,CRU3土壤 NH_3 挥发速率差异不显著。由图3b可知,各控释肥处理降低氨挥发积累量,尤其是脲酶抑制剂与硝化抑制剂联合作用,对降低土壤氨挥发积累量效果更好。这表明将脲酶抑制剂、硝化抑制剂或其组合与尿素联合包膜,尿素缓慢溶出的同时,抑制剂也缓慢溶出,其中脲酶抑制剂减缓了酰胺态氮水解,土壤中 NH_4^+-N 含量降低,单独施用硝化抑制剂涂层包膜控释肥,虽然会延缓铵态氮向硝态氮的转化,但是由于膜内氮素缓慢溶出,不会显著增加土壤 NH_3 挥发速率。

2.3 双控释尿素对冬小麦生物量和叶绿素含量的影响

由表1可知,与CK相比,各施肥处理地上部鲜、干物质质量均明显提高。苗期除CRU4处理外其余控释肥处理冬小麦鲜物质质量无显著差异,CRU0和CRU4处理干物质积累量显著提高。开花期,与U处理相比,各控释肥处理冬小麦营养器官鲜、干物质质量分别增加5.66%~9.45%和2.80%~23.36%,其中CRU4对冬小麦鲜、干物质质量提高效果最好。这可能是由于氮素与NBPT和DMPP同时缓慢释

放，冬小麦生育前期养分吸收较少，生育后期养分供应合理，可促进小麦氮素利用，提高小麦产量。这表明在减施 10% 氮素条件下，施用新型控释尿素，

尤其是将脲酶抑制剂与硝化抑制剂和天然橡胶联合包膜制备的双控释尿素，养分调控能力强，促进小麦生长。



注：CK—不施尿素处理；U—普通尿素处理；CRU0—环氧树脂包膜控释肥；CRU1—天然橡胶包膜控释肥；CRU2—NBPT 涂层+天然橡胶包膜尿素；CRU3—DMPP 涂层+天然橡胶包膜尿素；CRU4—NBPT+DMPP 涂层+天然橡胶包膜尿素。下同。Note: CK- No urea was applied; U- Conventional urea; CRU0-Epoxy resin coated controlled-release fertilizer; CRU1- Natural rubber coated controlled-release fertilizer; CRU2- NBPT coating + natural rubber coated controlled release fertilizer; CRU3- DMPP coating + natural rubber coated controlled release fertilizer; CRU4- NBPT+DMPP coating + natural rubber coated controlled release fertilizer. The same below.

图 3 土壤氨挥发速率 (a) 及氨挥发累积量 (b)

Fig. 3 Soil NH_3 volatilization rate (a) and accumulative NH_3 volatilization (b)

表 1 不同控释肥处理下不同生育期冬小麦地上部生物量

Table 1 Aboveground biomass of winter wheat at different growth stages under different controlled-release fertilizer treatments/[g·(5 plants)⁻¹]

| 处理 Treatment | 苗期 Seedling stage | | 开花期 Flowering stage | | | |
|-----------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| | 鲜物质量 Fresh biomass | 干物质量 Dry biomass | 营养器官 Vegetative organs | | 生殖器官 Reproduction organs | |
| | | | 鲜物质量 Fresh biomass | 干物质量 Dry biomass | 鲜物质量 Fresh biomass | 干物质量 Dry biomass |
| | | | | | | |
| CK | 0.76d | 0.66c | 24.22c | 9.56c | 13.71b | 4.44d |
| U | 1.13bc | 0.95b | 27.99abc | 10.70b | 15.02ab | 5.07cd |
| CRU0 | 1.39abc | 1.22a | 30.14a | 11.98a | 17.42a | 6.08ab |
| CRU1 | 1.49ab | 1.00ab | 29.55ab | 11.00b | 16.18ab | 5.63abc |
| CRU2 | 1.07bc | 0.73bc | 26.09bc | 11.03b | 15.94b | 5.45bc |
| CRU3 | 1.20ab | 0.90bc | 29.78ab | 10.54b | 15.92ab | 5.36bc |
| CRU4 | 1.74a | 1.21a | 30.64a | 13.19a | 17.78a | 6.55a |

注：同列不同字母表示差异达 5% 显著水平，下同。Note: Different letters in the same column indicate a significant difference of 5%, the same below.

由表 2 可知，施肥能显著提高冬小麦开花期叶片叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素的含量。与 U 处理相比，CRU0、CRU1、CRU2、CRU4 冬小麦开花期叶片叶绿素 (a+b) 含量分别显著增加 14.26%、

13.13%、21.66%、17.03%；与 U 处理相比，CRU3 小麦开花期叶绿素 (a+b) 含量无显著差异。这表明生化抑制剂的加入，尤其是脲酶抑制剂与天然橡胶包膜的联合作用，合理控制氮素释放及转化，在小

麦生育后期依然提供充足的氮素供应, 促进小麦叶片叶绿素合成, 进而提高小麦光合作用。叶绿素 a、

叶绿素 b 和类胡萝卜素含量变化与叶绿素 (a+b) 含量变化一致。

表 2 小麦开花期叶绿素含量

Table 2 Chlorophyll content of wheat at the flowering stage/ (mg·g⁻¹ FW)

| 处理 Treatment | 叶绿素 (a+b) Chl (a+b) | 叶绿素 a Chl a | 叶绿素 b Chl b | 类胡萝卜素 Carotenoid |
|-----------------|------------------------|----------------|----------------|---------------------|
| CK | 2.737b | 2.061d | 0.676c | 0.325c |
| U | 2.988b | 2.251b | 0.737c | 0.469a |
| CRU0 | 3.414a | 2.425a | 0.988ab | 0.459ab |
| CRU1 | 3.380a | 2.412a | 0.968ab | 0.460ab |
| CRU2 | 3.635a | 2.476a | 1.159a | 0.450ab |
| CRU3 | 2.953b | 2.154c | 0.799bc | 0.401b |
| CRU4 | 3.496a | 2.443a | 1.053a | 0.512a |

2.4 双控释尿素对冬小麦产量及产量构成因素的影响

由表 3 可知, 与 CK 相比, 各施肥处理冬小麦成熟期干物质积累量及产量均明显提高, 增幅达 3.04%~45.03%和 16.10%~46.17%, 表明施肥能促进小麦生长, 提高冬小麦产量。与 U 处理相比, 各控释肥处理小麦干物质积累量提高 12.04%~40.75%; 与 U 处理相比, 各控释肥处理冬小麦产量显著提高 16.96%~25.90%, 与干物质积累量的变化趋势略有差异, 表现为: CRU4>CRU2>CRU0>CRU3>CRU1。CRU4 在提高冬小麦成熟期干物质积累量和提高小麦产量方面表现最好。

就产量构成因素而言, 各处理之间穗粒数和千粒重差异不显著, 穗数是引起产量差异的关键因素, 与产量呈正相关。与 U 处理相比, 控释肥处理成熟期穗数增幅达 0.75%~14.39%, CRU4 在提高冬小麦成熟期穗数方面效果最好。表明将生化抑制剂与尿素联合包膜制备的新型双控释肥, 能实现对施入土壤的普通速效氮肥的溶解及氮素转化的控制, 使更多的养分被小麦吸收, 在氮素减施 10%的基础上依然能实现冬小麦增产、稳产。

2.5 双控释尿素对小麦氮素利用的影响

氮素吸收效率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥回收效率四项, 从不同角度描述作物对氮素

表 3 小麦产量及产量构成因素

Table 3 Wheat yield and yield components

| 处理 Treatment | 干物质积累量 Dry matter production/ (kg·hm ⁻²) | 穗数 Spike number/ (10 ⁴ ·hm ⁻²) | 穗粒数 Kernel number/Spike | 千粒重 1 000-kernel weight/g | 产量 Yield/ (kg·hm ⁻²) |
|-----------------|--|---|----------------------------|------------------------------|--|
| CK | 16 976d | 690c | 29.60b | 38.23b | 6 556d |
| U | 17 492cd | 713b | 29.40b | 40.90ab | 7 611c |
| CRU0 | 21 546b | 790a | 30.60ab | 43.03a | 9 122b |
| CRU1 | 20 497b | 784ab | 33.80ab | 42.43a | 8 902b |
| CRU2 | 23 717a | 790a | 31.00ab | 40.87ab | 9 244ab |
| CRU3 | 19 599bc | 719b | 35.40a | 40.90ab | 8 933b |
| CRU4 | 24 620a | 816a | 30.20ab | 43.17a | 9 582a |

吸收利用程度。由表 4 可知，与 U 处理相比，各控释肥处理显著提高氮素吸收效率 11.15%~35.53%，表现为：CRU4>CRU0>CRU2>CRU3>CRU1，表明控释肥及抑制剂与包膜联合制备的控释肥，能显著提高冬小麦氮素吸收效率，其中 CRU4 对氮素利用提高效果最显著。与 CRU0 相比，CRU4 氮肥偏生产力提高 5.04%，氮素农学利用率提高 17.92%；与

U 处理相比，各控释肥处理氮肥回收效率平均显著提高 1.65 倍，其变化趋势与氮素吸收效率变化趋势一致，其中 CRU4 氮肥回收效率最高，为 U 处理的 2.43 倍。表明将脲酶抑制剂及硝化抑制剂同尿素联合包膜的双控释尿素，对施入土壤氮素的控制效果更优，实现了对普通尿素的“控溶”与“控转”，有效提高氮肥利用率。

表 4 不同控释肥处理对小麦氮素吸收利用的影响

Table 4 Effects of different controlled-release fertilizers on nitrogen absorption and utilization of Wheat

| 处理 Treatment | NUPE/% | NPFP/ (kg·kg ⁻¹) | NFAE/ (kg·kg ⁻¹) | NR/% |
|--------------|---------|-------------------------------|-------------------------------|---------|
| CK | - | - | - | - |
| U | 51.86c | 31.71c | 4.40c | 24.53c |
| CRU0 | 84.31a | 42.23ab | 11.88ab | 76.04a |
| CRU1 | 67.85b | 41.21b | 10.86b | 48.37b |
| CRU2 | 78.49ab | 42.80ab | 12.45ab | 66.25ab |
| CRU3 | 69.39b | 41.36b | 11.01b | 50.97b |
| CRU4 | 89.08a | 44.36a | 14.01a | 84.04a |

注：NUPE、NPFP、NFAE 和 NR 分别表示氮素吸收效率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥回收率。Note: NUPE, NPFP, NFAE and NR means nitrogen uptake efficiency, partial factor productivity of applied N, nitrogen fertilizer agronomic efficiency, nitrogen recovery rate, respectively.

2.6 双控释尿素对土壤供氮能力及 NH₄⁺-N 表现硝化率的影响

由图 4a 可知，U 处理小麦生育期内土壤 NH₄⁺-N 表现先低后高再降低的变化趋势，这可能是由于拔节期追施尿素，导致开花期 U 处理 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 升高。各控释肥处理土壤铵态氮变化趋势基

本相同，均表现为先升高后降低，但是升高时期不同，CRU0、CRU1 和 CRU3 在越冬期前后出现 NH₄⁺-N 最大值，而 CRU2 和 CRU4 土壤 NH₄⁺-N 最大值出现在开花期前后。与 U 处理相比，各控释肥处理苗期土壤 NH₄⁺-N 显著降低 21.12%、16.05%、25.74%、22.12%、17.86%。

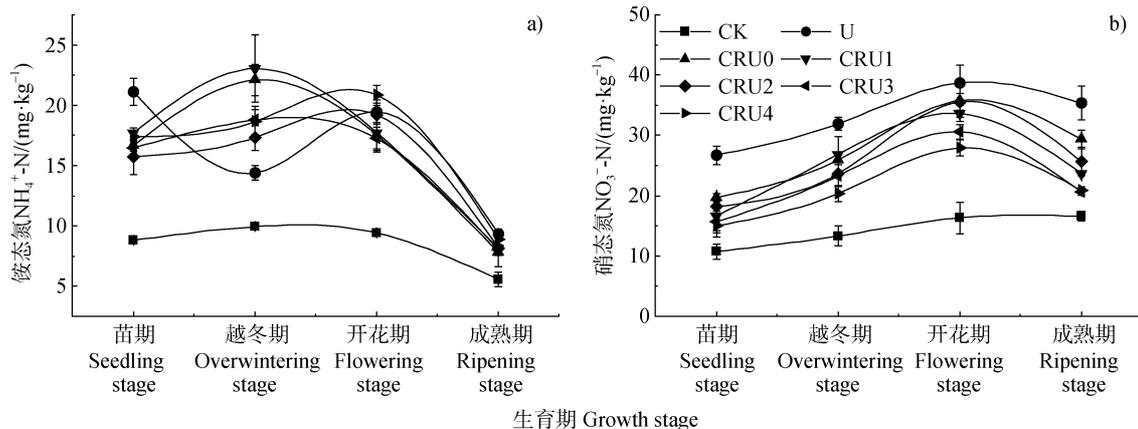


图 4 不同控释肥处理下小麦不同生育期土壤 NH₄⁺-N (a) 和 NO₃⁻-N (b) 含量变化

Fig. 4 Changes of soil NH₄⁺-N (a) and NO₃⁻-N (b) contents in different growth stages of wheat under different controlled-release fertilizer treatments

由图 4b 可知, 施肥处理土壤 NO_3^- -N 均表现为先升高后降低的趋势。在小麦生育期内 CRU3 和 CRU4 对土壤 NO_3^- -N 含量控制较优, 始终保持在较低水平。成熟期, 与 U 处理相比, CRU3 和 CRU4 分别显著降低土壤 NO_3^- -N 含量 41.71% 和 40.77%, 表明 DMPP 及 NBPT+DMPP 涂布尿素与天然橡胶联合包膜, 能有效控制土壤中 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 转化, 降低成熟期耕层土壤 NO_3^- -N 含量, 减少 NO_3^- -N 的淋溶损失。以上结果表明, 脲酶抑制剂 NBPT 与硝化抑制剂 DMPP 复合添加, 既能控制尿素水解, 减少土壤氮素以 NH_3 的形式损失 (图 3), 又能延缓土壤 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 的转化, 使土壤 NO_3^- -N 始终保持在较低水平。

由表 5 可知, 小麦整个生育期 U 处理土壤中

NH_4^+ 的硝化作用始终处于较高水平。小麦苗期, 与 U 处理相比, CRU0、CRU1、CRU2、CRU3、CRU4 的土壤 NH_4^+ -N 表观硝化率分别下降 3.00%、13.56%、3.73%、12.80%、17.16%, 表明包膜控释肥养分释放合理, 将其与硝化抑制剂联合包膜能降低土壤硝化作用, 降低土壤 NH_4^+ -N 表观硝化率, 减少 NO_3^- -N 的淋溶损失, 促进作物养分吸收, 提高氮肥利用率。小麦生育期内, 单独添加 DMPP 和 NBPT+DMPP 复合处理土壤铵态氮表观硝化率均处于较低水平, 表明 NBPT 与 DMPP 能够显著降低小麦生长期土壤中 NH_4^+ 的硝化作用, 减少氮的损失。其中 CRU4 土壤中 NH_4^+ 的硝化作用始终维持较低水平, 表明 NBPT+DMPP 既能抑制氨气挥发 (图 3), 又能抑制 NH_4^+ 氧化, 进而提高土壤有效氮含量。

表 5 不同控释肥处理下小麦不同生育期土壤 NH_4^+ -N 的表观硝化率

Table 5 The apparent nitrification rate of soil NH_4^+ -N in different growth stages of wheat under different controlled-release fertilizer treatments /%

| 处理 Treatment | 苗期 Seedling stage | 越冬期 Overwintering stage | 开花期 Flowering stage | 成熟期 Ripening stage |
|-----------------|----------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|
| CK | 54.75a | 57.22b | 63.20a | 74.94bc |
| U | 55.76a | 68.90a | 66.54a | 78.98a |
| CRU0 | 54.09a | 54.04b | 67.09a | 79.08a |
| CRU1 | 48.20b | 53.79bc | 65.50a | 74.42bc |
| CRU2 | 53.68a | 57.77bc | 64.98a | 75.82b |
| CRU3 | 48.62b | 55.41bc | 63.96a | 71.97cd |
| CRU4 | 46.19b | 52.15c | 57.28b | 70.22d |

2.7 双控释尿素对土壤脲酶活性的影响

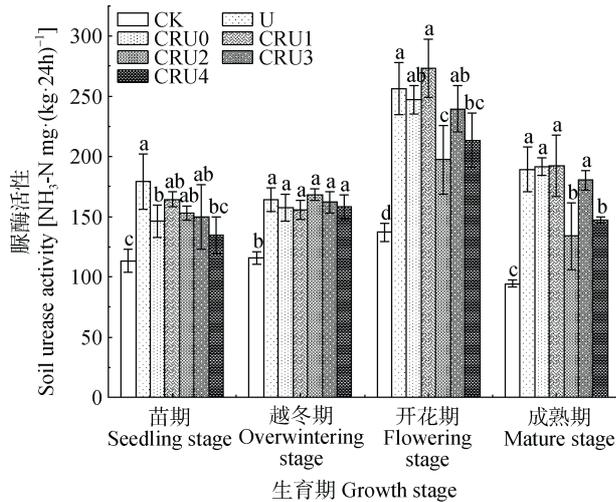
由图 5 可知, 小麦生育期内各施肥处理土壤脲酶活性均显著高于 CK, 其中脲酶活性在开花期达到最大, NBPT 涂层包膜尿素可显著降低脲酶活性。冬小麦生育前期, 与 U 处理相比, 各控释肥处理土壤脲酶活性变化差异不显著, 这可能是由于冬小麦生长前期土壤温度较低, 导致土壤脲酶活性降低, 而且温度影响控释肥养分释放。在小麦生长后期, 包膜能显著延长脲酶抑制剂作用时间, 使土壤脲酶活性保持在相对较低水平。开花期, 与 U 处理相比, CRU2 和 CRU4 土壤脲酶活性分别显著降低 23.08% 和 16.79%; 成熟期, 与 U 处理相比, CRU2 和 CRU4 土壤脲酶活性分别显著降低 29.29% 和 22.28%。表

明将脲酶抑制剂与普通尿素联合包膜, 能延长抑制剂持效期, 尤其是在小麦生育后期, 将土壤脲酶活性保持在较低水平, 可有效延缓尿素转化进程, 减少氮素损失。

3 讨论

3.1 天然橡胶包膜控释尿素的微观结构及养分释放特征评价

在整个生育期内, 小麦养分需求曲线呈“S”型^[22], 因此, 根据小麦生长需求适时适量地补充氮素对小麦高产稳产尤为重要。与施用普通速效氮肥需追施不同, 控释肥可对养分进行适度调整, 根据作



注：图中不同字母表示同生育期不同处理差异达 5% 显著水平，下同。Note: Different letters in the figure indicate that the difference between different treatments in the same growth stage reaches a significant level of 5%, the same below.

图 5 不同控释肥处理下小麦不同生育期土壤脲酶活性
Fig. 5 Soil urease activity in different growth stages of wheat under different controlled-release fertilizer treatments

物需求释放养分,一次基施就能满足小麦整个生育期养分需求^[18]。通过对缓控释肥养分释放机理的研究,可明确控释肥养分释放机理,提高肥料利用率。缓控释肥养分释放受诸多环境因素的影响,例如缓控释肥包膜材料特性、包膜厚度、土壤微生物、土壤温度、土壤湿度等。就膜材料影响肥料养分释放而言,主要有两种方式,分别是“扩散机制”和“破裂机制”^[23]。扫描电镜结果(图 1)表明,天然橡胶作为膜材料制备的控释肥,表面相对光滑致密,成膜完整,表面有少许微孔,断面部分存在少量崎岖的通道,这符合关于“扩散机制”的描述,即控释肥颗粒施入土壤后,土壤水气通过渗透作用进入膜壳,溶解肥芯后使得膜壳内外存在浓度差,通过改变膜壳微观结构,增加通道密度,养分通过通道缓慢释放。天然橡胶包膜控释肥养分释放合理,25℃静水条件下控释期可达 60 d 左右(图 2),释放曲线呈“S”型,养分释放停滞期、加速期和衰减期明显,氮肥肥效后移的作用明显。此外,本研究所采用植物源天然橡胶,来源广泛、价格低廉,可减轻环境污染,改善农业生态环境。

3.2 天然橡胶与生化抑制剂联合包膜控释尿素对氮素转化的影响

施入土壤中的尿素,在土壤脲酶的作用下迅速

水解为作物可吸收利用的无机态氮化合物,造成尿素时效短、利用率低。而脲酶作为土壤氮素循环唯一作用于尿素的土壤水解酶类^[19],其活性是影响尿素水解的主要因素,脲酶活性强,尿素水解快,短时间内土壤养分盈余,造成氮素损失。因而,抑制脲酶活性是提高氮素利用率的重要途径。单独施用脲酶抑制剂存在吸附固定、降解等问题,限制脲酶抑制剂的作用时效^[16]。李玉等^[18]发现,将 HQ(氢醌)与尿素共包膜,可延长 HQ 对土壤脲酶作用时效。施入土壤中的尿素短时间内快速水解,释放出的 NH₄⁺-N 不能被作物完全吸收,导致盈余的氮素以 NH₃ 的形式损失,而 NH₄⁺-N 经微生物氧化生成的 NO₃⁻-N 容易发生淋洗,造成氮素损失和农业面源污染。陈剑秋等^[10]研究表明,包膜尿素有效控制尿素溶解,延长尿素释放周期,能克服尿素溶解过快的缺点。张文学等^[24]研究表明,脲酶抑制剂能降低脲酶活性,延缓尿素水解。毛新伟等^[25]研究表明,硝化抑制剂抑制硝化作用,降低铵态氮向硝态氮的转化速率。本试验研究表明,将 NBPT+DMPP 涂层尿素与天然橡胶联合包膜制备的双控释尿素,既能控制尿素的溶解,又能降低土壤脲酶活性(图 5),延缓尿素水解,降低土壤 NH₄⁺-N 含量,同时降低土壤 NH₄⁺-N 的表观硝化率(表 5),减少氮素损失,强化土壤供氮能力,提高小麦氮素利用率,实现土壤养分供应与作物养分需求相匹配。

氨挥发是土壤氮素损失的重要途径之一^[26]。研究表明,受气候条件、耕作方式、农田水分管理等因素影响,约 10%~60% 表施氮肥以 NH₃ 挥发的形式损失^[27],其中 NH₄⁺-N 的含量是影响土壤 NH₃ 挥发损失的最直接原因。普通尿素施入土壤后,迅速溶解,在脲酶作用下短时间内水解,使得土壤 NH₄⁺-N 含量迅速升高,而作物生育前期养分需求较低,根系尚未完全发育,对养分吸收能力较弱,导致土壤 NH₄⁺-N 盈余,氨挥发速率加快。本研究结果显示,与普通树脂包膜及天然橡胶包膜尿素相比,将脲酶抑制剂与尿素共包膜制备 NBPT 涂层控释尿素, NH₃ 发速率及 NH₃ 挥发积累量(图 3)均降低,这与田间试验 NH₄⁺-N 变化(图 4a)一致,表明双控释尿素在调节土壤供氮能力方面效果显著,可实现氮素的减损增效。

3.3 天然橡胶与生化抑制剂联合包膜控释尿素对小麦产量的影响

前人研究结果^[17-18]表明,将生化抑制剂与包膜结合,能促进作物生长,提高作物产量。本研究表明,将抑制剂与尿素联合包膜的双控释尿素,能提高氮肥利用率,促进小麦氮素吸收(表4),这与李玉等^[18]研究结果一致。这是由于将抑制剂与尿素共包膜,既保证尿素的缓慢溶出又延缓溶出尿素的转化过程,提高小麦生育后期土壤供氮能力(图4),减少氮素损失,达到增产效果。尤其是NBPT+DMPP涂层尿素与天然橡胶包膜的CRU4,对冬小麦的增产效果最显著(表3),表明脲酶抑制剂与硝化抑制剂的联合控氮作用大于单独抑制剂的作用效果,养分供应合理,促进小麦增产、稳产。

4 结 论

用天然橡胶作为控释肥膜材料制备的控释肥,养分通过通道扩散释放,其控释效果较普通树脂包膜控释肥略差,但具有环保优势。NBPT和DMPP与天然橡胶联合包膜制备的“双控释尿素”,有效抑制了土壤中脲酶活性,延缓了尿素水解,降低了土壤NH₃挥发速率,维持适宜的土壤无机氮浓度,减少了氮素损失,提高了土壤供氮能力,弥补了单独天然橡胶包膜控释肥养分释放过快的缺点。“双控释尿素”CRU4在增强土壤供氮能力、提高小麦产量和提高施肥效益等方面优于单独添加NBPT或DMPP处理,一次性施用能够促进冬小麦生长,提高氮素利用率,在氮素减施10%条件下较U处理增产达25.90%。

参考文献 (References)

- [1] Cheng Y, Zhang J B, Cai Z C. Key role of matching of crop-specific N preference, soil N transformation and climate conditions in soil N nutrient management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 507—515. [程谊, 张金波, 蔡祖聪. 气候-土壤-作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (3): 507—515.]
- [2] Zhang S J, Huang Y J, Ren Q C, et al. Effects of nitrogen fertilization on leaf senescence, photosynthetic characteristics, yield, and quality of different flue-cured tobacco varieties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (3): 668—674. [张生杰, 黄元炯, 任庆成, 等. 氮素对不同品种烤烟叶片衰老、光合特性及产量和品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (3): 668—674.]
- [3] Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20 (4): 783—795. [巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (4): 783—795.]
- [4] Zhang W F, Ma L, Huang G Q, et al. The development and contribution of nitrogenous fertilizer in China and challenges faced by the country[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 (15): 3161—3171. [张卫峰, 马林, 黄高强, 等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (15): 3161—3171.]
- [5] Feng X J, Zhan X M, Wang Y, et al. Effects of stabilized nitrogen fertilizer reduction on nitrogen uptake of spring maize and inorganic nitrogen supply in soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (7): 1216—1225. [冯小杰, 战秀梅, 王颖, 等. 稳定性氮肥减施对春玉米氮素吸收及土壤无机氮供应的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (7): 1216—1225.]
- [6] Chen D. Pilot study on coated slow/controlled release fertilizer and the determination of slow/controlled fertilizer[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. [陈迪. 包膜缓/控释肥中试研究及缓/控释肥规律测定[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.]
- [7] Tong Y X, Li Y Y, Liu S Q, et al. Variations of the grain yields and N absorption of spring maize in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20 (5): 1094—1102. [佟玉欣, 李玉影, 刘双全, 等. 黑龙江春玉米籽粒产量与氮素吸收变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (5): 1094—1102.]
- [8] Han W J. Study on the application effectiveness and environmental effect of new-type fertilizer in the black soil[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015. [韩蔚娟. 新型肥料在黑土上的施用效果及环境效应研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.]
- [9] Shi W J, Xiong H R, Wen Z Y, et al. Research status and development trends of slow/controlled release fertilizer[J]. *Henan Chemical Industry*, 2020, 37 (8): 8—11. [史万杰, 熊海蓉, 文祝友, 等. 缓/控释肥研究现状及发展趋势[J]. *河南化工*, 2020, 37 (8): 8—11.]
- [10] Chen J Q, Zhang M, Yang Y C. Study on nutrient releasing characteristics of membrane wrapping control-releasing fertilizer[J]. *Chemical Fertilizer Design*, 2006, 44 (2): 56—58, 61. [陈剑秋, 张民, 杨越超. 包膜控释肥养分释放特性的研究[J]. *化肥设计*, 2006, 44 (2): 56—58, 61.]
- [11] Ma H H, Sun L, Wu X M, et al. The influence of polymer structure on slow release performance of coated fertilizers[J]. *Polymer Bulletin*, 2015 (1): 25—31. [马海红, 孙利, 吴雪梅, 等. 聚合物结构对包膜缓释肥缓

- 释性能的影响[J]. 高分子通报, 2015 (1): 25—31.]
- [12] Zhou X, Wu L H, Dai F, et al. Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on nitrogen dynamics in surface water and leachate from yellow clayey paddy field[J]. *Soils*, 2019, 51 (3): 434—441. [周旋, 吴良欢, 戴锋, 等. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季田面水及渗漏液氮素动态变化的影响[J]. *土壤*, 2019, 51 (3): 434—441.]
- [13] Li Y T, Li X Y, Zhao B Q, et al. Effect of controlled-release compounded fertilizers on maize yields and leaching loss of nitrate in soil profile[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008 (5): 45—48. [李燕婷, 李秀英, 赵秉强, 等. 缓释复混肥料对玉米产量和土壤硝态氮淋失累积效应的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2008 (5): 45—48.]
- [14] Dong Y J, Wan Y S, Zhang M, et al. Effect of controlled release blend bulk fertilizers on the soil ammonium and nitrate nitrogen content during the growing season of peanut[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23 (6): 203—207. [董元杰, 万勇善, 张民, 等. 控释掺混肥对花生生育期间剖面土壤铵态氮和硝态氮含量变化的影响[J]. *华北农学报*, 2008, 23 (6): 203—207.]
- [15] Diego A, Simon J, Alberto S, et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2014, 189: 136—144.
- [16] Wu Z J, Shi Y L, Li D P, et al. The development and outlook of stabilized fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23 (6): 1614—1621. [武志杰, 石元亮, 李东坡, 等. 稳定性肥料发展与展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (6): 1614—1621.]
- [17] Hou J, Dong Y J, Li G Z, et al. N-release characteristics of coated compound fertilizers added by nitrification inhibitor and their effects on Chinese cabbage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (6): 250—253, 259. [侯俊, 董元杰, 李光宗, 等. 硝化抑制剂型包膜复合肥的氮素释放特征及其对大白菜生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25 (6): 250—253, 259.]
- [18] Li Y, Wang M Y, Zhang Q, et al. Effects of coated urease inhibitor synergic urea on wheat growth and its mechanism[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (2): 283—289. [李玉, 王茂莹, 张倩, 等. 包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦生长的影响及其机理研究[J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (2): 283—289.]
- [19] Zhang L L, Wu Z J, Chen L J, et al. Effect of coating and dicyandiamide incorporation on NH_4^+ nitrification and NO_3^- leaching[J]. *Ecology and Environment*, 2009, 18 (4): 1508—1515. [张丽莉, 武志杰, 陈利军, 等. 双氰胺与尿素共包被对 NH_4^+ 硝化及 NO_3^- 淋溶的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18 (4): 1508—1515.]
- [20] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Slow release fertilizer: GB/T 23348-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 缓释肥料: GB/T 23348-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.]
- [21] Feng X, Duan J P, Pu X P, et al. Comparative analyses between two methods of measuring soil urease activity[J]. *Grassland and Turf*, 2008, 28 (2): 70—72. [丰骁, 段建平, 蒲小鹏, 等. 土壤脲酶活性两种测定方法的比较[J]. *草原与草坪*, 2008, 28 (2): 70—72.]
- [22] Zheng C Y, Yu Z W, Wang X Z, et al. Effects of irrigation amount and stage on nitrogen accumulation, distribution, translocation and soil NO_3^- -N content in high-yield wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (6): 1324—1332. [郑成岩, 于振文, 王西芝, 等. 灌水量和时期对高产小麦氮素积累、分配和转运及土壤硝态氮含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (6): 1324—1332.]
- [23] Zhang X. Preparation and characterization of environment-friendly slow/controlled release fertilizers[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2019. [张校. 环境友好型缓控释肥料的制备及表征[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2019.]
- [24] Zhang W X, Wang P, Sun G, et al. Effects of variety succession and soil fertility on wheat yield and phosphorus physiological efficiency[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018 (6): 38—44. [张文学, 王萍, 孙刚, 等. 脲酶抑制剂不同用量对土壤氮素供应的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018 (6): 38—44.]
- [25] Mao X W, Cheng M, Xu Q F, et al. Effects of nitrification inhibitors on soil N_2O emission and community structure and abundance of ammonia oxidation microorganism in soil under extensively managed *Phyllostachys edulis* stands[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (6): 1528—1540. [毛新伟, 程敏, 徐秋芳, 等. 硝化抑制剂对毛竹林土壤 N_2O 排放和氨氧化微生物的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (6): 1528—1540.]
- [26] Huang S, Lv W, Bloszies S, et al. Effects of fertilizer management practices on yield-scaled ammonia emissions from croplands in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2016, 192: 118—125.
- [27] Hayashi K, Nishimura S, Yagi K. Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea: Rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390 (2/3): 485—494.

(责任编辑: 陈荣府)