

腐植酸包膜尿素减少土壤氮素损失的研究

Konstantin Korsakov¹, Alexey Stepanov², Lev Pozdnyakov², Olga Yakimenko² 著

刘晓蕾³ 寇太记^{3*} 译

1 俄罗斯莫斯科生命力量集团有限责任公司 莫斯科 119234

2 俄罗斯莫斯科国立大学土壤科学系 莫斯科 119991

3 河南科技大学农学院 洛阳 471023

摘 要: 通过室内模型试验,以普通尿素(U)、腐植酸包膜尿素(U-HA)和脲酶抑制剂 N-(正丁基)硫磷三酰胺处理尿素(U-UI)为研究对象,研究了 3 种尿素肥料对土壤氮素转化过程的影响。更正研究了尿素肥料对土壤化学(水浸提 N-NH₄ 和 N-NO₃ 含量)和微生物特性(N₂O 实际和潜在排放速率、基础呼吸和底物诱导的呼吸、微生物生物量碳、乙烯排放速率)的影响,旨在验证:(i) 腐植酸包膜尿素是否具有减少土壤氮素损失的能力;(ii) 与合成脲酶抑制剂相比,它是如何影响土壤生物活性的。结果表明,U-HA 在减少土壤氮素损失方面具有与 U 相当的优势,使土壤 N-NH₄ 含量增加了 35%,硝酸盐含量减少了 9%,N₂O 排放减少了 50%。U-HA 使土壤基础呼吸提高了 10%,土壤微生物群落比活性提高了 7%,提供了最高的代谢熵 qCO₂。与 U-UI 相比,U-HA 主要表现为介于 U-UI 和 U 之间的效果。考虑到腐植酸原料成本低,U-HA 可以被认为是减少土壤氮素损失的有前景的工具。

关键词: 腐殖质; 腐植酸钾; 风化褐煤; 尿素; 无机养分; 氨化作用; 反硝化作用; 脲酶抑制剂

中图分类号: TQ314.1, TQ441.41 **文章编号:** 1671-9212(2024)05-0050-09

文献标识码: A

DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2024.05.008

Humate-Coated Urea as a Tool to Decrease Nitrogen Losses in Soil

Konstantin Korsakov¹, Alexey Stepanov², Lev Pozdnyakov², Olga Yakimenko² write

Liu Xiaolei³, Kou Taiji^{3*} translate

1 Life Force Group LLC Moscow, Moscow, Russia, 119234

2 Department of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russia, 119991

3 College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, 471023

Abstract: Processes of N transformation in soil as affected by application of the three kinds of urea fertilizers, conventional urea (U), humate-coated urea (U-HA), and urea treated with the urease inhibitor NBPT (U-UI), are examined in a model laboratory experiment. Effects of urea fertilizers on soil chemical (content of water-extractable N-NH₄ and N-NO₃), and microbiological properties (rate of actual and potential N₂O emission, basal and substrate-induced respiration, microbial biomass C, emission of ethylene) are focused to answer the following questions: (i) whether humate-coated urea has the ability to decrease N losses in soil; and (ii) how it affects soil biological activity comparable to synthetic urease inhibitor. The results showed that U-HA demonstrated advantages comparable to U in its ability to decrease N losses in soil: it increased N-NH₄ content by 35%, reduced nitrate content by 9%, and decreased N₂O emissions

[收稿日期] 2023-10-04

[译者简介] 刘晓蕾, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为植物逆境生理生态, E-mail: Liuxiaolei0999@163.com。* 通讯联系人: 寇太记, 男, 教授, E-mail: tjkou@haust.edu.cn。



by 50%. U-HA promoted basal soil respiration by 10% and the specific activity of the soil microbial community by 7%, providing the highest metabolic quotient $q\text{CO}_2$. Comparably to NBPT-treated U, U-HA mainly shows intermediate results between U-UI and conventional U. Considering the low cost of raw humates, U-HA can be regarded as a promising tool to decrease N losses in soils.

Key words: humic substances; potassium humate; leonardite; urea; inorganic nutrients; ammonification; denitrification; urease inhibitor

氮素是植物营养的必需元素，氮素的最佳供给是农业生产的关键因素。在全球范围内，氮肥施用量从 1970 年的 3200 万吨 / 年预计增加到 2050 年 1.3 ~ 1.5 亿吨 / 年。然而，由于氮素的挥发（以氨和氮氧化物形式出现的气态损失）和作为硝酸盐离子的淋溶导致氮素的非生产性损失，给土壤 - 植物系统中氮素供应的适当管理带来挑战。在现代农业系统中，氮素损失可达施氮量的 50% ~ 70%。反之，它又会导致地球大气中 NH_3 和 N_2O 浓度的增加，从而导致温室气体驱动的气候变化。硝酸盐 (NO_3^-) 从陆地向水生生态系统的淋溶导致生态系统生产力和生物多样性的变化、富营养化和淡水资源的硝酸盐污染。

尿素是氮肥的主要形式，占全球农业氮投入的一半以上。因此，尿素的特点是施用量大和非生产性损失大。从化学角度讲，尿素是含有 46% 氮的碳酸二酰胺 [$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$]。尿素在土壤中的转化在其他文献有具体描述。简而言之，它在土壤中迅速发生氨化作用：在微生物分泌的土壤酶——脲酶催化下发生水解，分解生成气态氨和 CO_2 ，从土壤中挥发出来。在大多数农业土壤中，氨化作用会在几天内发生，具体取决于土壤湿度、温度和生物活性。

部分尿素溶解在土壤水中，并转化为碳酸铵。反过来，形成的铵部分被生物（植物和细菌）固定，部分被土壤有机组分固定，部分在不同土壤微生物催化下进行硝化作用（ NH_4^+ 氧化为 NO_3^- ）。因此，形成了亚硝酸盐和硝酸盐，并作为植物营养的氮素来源。硝酸盐除了被植物吸收和在农产品中积累外，还是一种与土壤结合力较差的阴离子，很容易淋溶并流入地下水，最终导致水资源富营养化。一旦处

于厌氧条件下（例如，在土壤团聚体内部），硝酸盐暴露于一系列反硝化土壤微生物中，这些微生物将硝酸盐还原为 N_2 、 N_2O 和其他含氮气体。反硝化作用是造成氮素损失的另一个原因。

当代减轻氮素损失的工具之一是使用氮循环过程的合成抑制剂：硝化抑制剂、脲酶或其他。基本上，这些抑制剂是具有生理活性的化合物，可与关键酶的蛋白质分子相互作用。它们整合到蛋白质结构中，要么破坏活性位点的功能，要么导致蛋白质完全变性。因此，它们抑制了酶的活性，减少了那些很容易从土壤中去掉的氮化合物的形成，这些氮化合物会以硝酸盐的形式淋溶或以气体（氨、氮及其氧化物）形式挥发。然而，尽管合成抑制剂能够提高氮素的利用效率，但也存在许多缺点，包括应用困难、成本、降解、污染和进入食品系统等方面的问题。因此，抑制剂或多或少会导致自然界氮循环的严重破坏和不平衡。其中，许多化合物表现出非特异性活性，能够通过各种机制干扰多种酶的活性，有证据表明它们对食品生产质量产生负面影响。

作为替代方案，可以考虑使用天然来源的抑制剂。其中，腐殖质 (HSs) 是一种大分子天然有机物，由带负电荷的聚电解质组成，含有疏水核心和多种官能团，包括醌、醛、羧基、酚类和醇羟基以及醚。

HSs 可能作为潜在的脲酶抑制剂，其可能的作用机制包括化学作用（与 HSs 的官能团相互作用而导致铵固定）和生化过程（HSs 的多酚成分对酶的抑制作用）。HSs 能够与带相反电荷的蛋白质形成强复合物，从而导致酶活性的变化。Li 等报道了 HSs 对脲酶活性和稳定性的影响取决于 pH、离子强度和 HSs/ 酶的质量比。Liu 等研究了 HSs 对

脲酶活性的抑制作用,并推测其抑制机制可能是 HSs 的官能团与脲酶的巯基相互作用,形成更大粒径的复合物从而抑制脲酶活性。最后,由于大量酸性官能团的存在,使其具有较高的交换能力,有利于氨的非生物固定,进而减少氨挥发,减轻 NO_3^- 淋溶和 N_2O 排放,从而减少氮素损失。此外,使用 HSs 的一个很大优势是它们可以从低阶煤中以低成本生产,并且可以在市场上购买。

此外,众所周知 HSs 与无机肥料(尿素)相结合的有益特性,为作物提供了更均衡的营养并优化了土壤性质。与普通氮肥相比,在 HSs 包膜中包裹矿肥颗粒具有一定的优势。这种有机矿物颗粒提供了有机质和添加的养分,由于有机质和/或微生物养分固定吸附的增加,减缓了养分的立即释放。由于 HS 包膜降低了尿素颗粒的溶解速度,从而减缓了与脲酶的接触。在进一步的氮素转化过程中,由于土壤微生物群落的界面存在高通量 HSs,可以增加土壤氨氧化微生物的种群密度,促进氨的固定,并阻止硝酸盐的形成,及随后的氨氧化物淋溶和/或氨形式的挥发。HS 尿素对作物产量的积极影响也有报道。

然而,这些过程的表现强度取决于土壤和气候条件以及腐植酸盐本身的性质。在干旱炎热的地区,大部分降雨只发生在春季,这时氮肥以氨挥发的形式大量损失。这促使农民使用更多剂量的氮肥,既导致更高的经济成本,也加速土壤有机质矿化、土壤枯竭和环境污染。

另一方面,在气候湿润、降水多的地区,由于硝酸盐淋溶和 N_2O 排放导致氮素损失较高,同时伴随着土壤有机质的流失,也促使农民使用更高剂量的氮肥,从而导致土壤去腐殖化、温室气体排放和整体环境污染。因此,无论是在干旱地区(如地中海、中亚和中东)还是湿润地区(如泰国、印度尼西亚、马来西亚、印度南部和中国),使用腐植酸包膜尿素作为传统化学品的“绿色”替代品似乎特别有前景。

此外,HSs 本身的化学性质和生物活性也因其有机质来源(褐煤、风化褐煤、泥炭、有机页岩、堆肥等)的不同有显著差异。因此,腐植酸包膜肥

料的试验样品需要在适当的土壤条件下进行初步试验,以得出其有效性和使用前景的结论。

本试验的目的是研究腐植酸包膜尿素、脲酶抑制剂处理尿素和普通尿素对土壤氮素转化过程的影响。本研究通过室内模拟春季土壤水淹,以激发硝酸盐的最大淋溶。本研究重点关注尿素肥料对土壤化学成分(水浸提的 N-NH_4 和 N-NO_3 含量)和微生物特性(N_2O 实际和潜在排放速率、基础呼吸和底物诱导呼吸、微生物生物量碳、乙烯排放速率)的影响,旨在回答以下问题:(i)腐植酸包膜尿素在减少土壤氮素损失方面是否具有与普通尿素相当的优势;(ii)与合成脲酶抑制剂相比,腐植酸包膜尿素如何影响土壤生物活性。

1 材料与方法

1.1 材料

普通尿素(U),含 46% 的氮,从当地生产商购买,并按收到的方式使用。腐植酸包膜尿素(U-HA)由俄罗斯莫斯科生命力量集团有限责任公司生产,制备如下。将尿素颗粒置于混合罐中,用 30% wt 腐植酸钾液体处理,其中含有 20% HS(腐植酸和黄腐酸)。液体腐植酸钾是由生命力量集团有限责任公司从源自俄罗斯克拉斯诺亚尔斯克地区的风化褐煤中通过碱性提取法生产出来的。腐植酸盐溶液通过喷嘴注入,然后在不断搅拌条件下提供加热空气流($85\text{ }^\circ\text{C}$)。在随后的冷却和干燥过程中,应用腐植酸钾作为抗结块剂和有机胶粘剂,粘在尿素颗粒上。最终的 U-HA 产物是腐植酸钾包裹尿素颗粒,含 2% HA。

比较 U-HA 对减少氨挥发的影响,用脲酶抑制剂(UI) N-(正丁基)硫磷三酰胺(NBPT)(法国巴黎 Rhodia 运营公司)处理单独的样品 U,按照制造商提供的建议,每 1000 kg U 使用 3.2 L UI 处理。为了获得 UI 处理过的尿素(U-UI),本实验将 4 g U 置于烧瓶中,加入 12.8 μL NBPT,用手振荡使其充分混合。

所使用的土壤为俄罗斯卡卢加地区(54.4293 N, 36.5353 E)栽培砂壤土淋溶土(7.5% 粘土, 30.5%



粉土, 62.0% 砂) 的顶层土壤, pH 为 6.3, 总碳含量为 1.76%, 总氮含量为 0.18%。

1.2 试验

将自然含水率为 11.7% 的土壤样品混匀, 去除土壤中大的根状物。将新鲜土壤用 3 mm 筛子筛分, 放入冰箱保存, 直到试验开始 (4 天)。试验开始前, 土壤在室温下保存 2 h。将新鲜未干燥的土壤样品 (200 g) 放置在 300 mL 底部有孔的花盆里。在每个花盆的底部预先放置一个尼龙过滤器。同时, 取土壤样品测定水分含量, 使结果达到无水分的基础。每个处理设置 5 个重复。

试验处理包括对照土壤和使用 3 种尿素 [U、U-HA 和 U-UI] 处理的土壤。尿素用量按照多种农作物的推荐量, 以 0.1803 g N/kg 土的特定比例施用。因此, U 和 U-UI (46% N) 处理的重量均为 0.0780 g/盆, U-HA 处理为 0.0795 g/盆 (2% HA 和尿素 98%), 将肥料颗粒均匀地撒在花盆土壤表面。为了模拟春季水淹的条件, 向土壤表面倾倒体积略超过土壤持水容量 (70 mL) 的蒸馏水, 使水完全渗透土壤, 并在滴盘上收集滴水。

花盆放置在人工气候室 (Binder KBW400) 中, 在 22 °C 和恒定光照下暴露 21 天。在暴露第 5、8、15 天, 对土壤进行模拟大雨加水处理。根据《气象学词汇表》, 当降水量在 7.6 ~ 50 mm/h 之间时, 降雨被归类为大雨。我们模拟了 10 mm 的降水, 小心地添加了 50 mL 蒸馏水, 记录了滴盘上水滴的外观。

第 22 天, 将花盆中的土壤取出, 使均质化, 并从每个花盆中取样, 进行水分测定、化学和微生物分析。

1.3 化学分析

使用多通道离子计 Expert-001, 采用离子选择电极 (ISEs) ECOM-NH₄ 和 ECOM-NO₃ 测定水浸提液 (1 : 2.5) 中 N-NO₃ 和 N-NH₄ 的含量。在测量硝酸盐和铵离子活性之前, 根据 ISEs 手册的建议, 将背景电解质溶液添加到试验提取液中, 以控制溶液的离子强度 (硝酸盐用 0.1 N K₂SO₄, 铵用 0.1 N NaNO₃)。将所得的 N-NH₄ 和 N-NO₃ 含量重新计算。用玻璃电极测定相同提取液中的 pH。分

析时使用初始水分含量样品为基础, 结果按无水分计算。土壤水分用重量法测定。

1.4 氮循环和碳循环过程强度分析

暴露结束后, 在对样品进行化学分析之前, 用取样器采集土壤样品 (5 g), 并将其放置在 15 mL 的玻璃瓶中。为了测定土壤基础呼吸 (BR) 和氮 (如 N₂O) 的实际损失, 用橡胶塞封闭小瓶, 在 22 °C 恒温器中孵育 24 h。之后, 用注射器从每个小瓶中抽取 0.25 mL 的气体样品, 并在 Crystal 5000.2 气相色谱仪 (俄罗斯约什卡尔奥拉 chrotek 公司) 上测定 CO₂、C₂H₄ 和 N₂O 的浓度, 如下所述。

为了测定底物诱导呼吸 (SIR), 向样品中添加 0.5 mL 葡萄糖溶液, 每 1 g 土壤中加入 2.5 mg 葡萄糖。然后, 用橡胶塞封闭小瓶, 在 22 °C 恒温器中孵育 2 ~ 3 h。记录每个样品的孵育时间, 并将其用于计算, 同时记录实验室空气中的初始 CO₂ 含量。SIR 值与微生物生物量碳成正比, 因为在测定过程中, 所有异养好氧微生物的生物量都被可利用的有机底物所激活。

采用乙炔法测量 N₂O 排放速率, 其中乙炔 (C₂H₂) 作为 N₂O 还原酶的抑制剂。在 C₂H₂ 存在的情况下, 反硝化的最终产物为 N₂O, 可以在气相色谱仪上进行高精度的测定。

为了确定潜在的 N₂O 排放速率, 将硝酸钾 (0.3 mg/g) 和葡萄糖 (2.5 mg/g) 分别添加到装有土壤样品的小瓶中, 用铝夹密封橡胶盖, 并用氩气吹扫 2 min 以去除氧气。之后, 用注射器向每个小瓶中加入 1 mL C₂H₂, 然后用手使劲摇晃, 以使 C₂H₂ 分布到整个土壤中。小瓶在 22 °C 恒温箱中孵育 24 h, 然后用注射器取 0.25 mL 气体样品, 用 Crystal 5000.2 气相色谱仪测定 N₂O 浓度。

气相色谱仪配有两个金属色谱柱, 长 2 m, 内径 1 mm, 填充 Hayesep-D 80/100。热导率检测器 (TCD) 和火焰电离检测器 (FID) 以链式连接到其中一个柱上, 用于测量 CO₂、CH₄、C₂H₄ 和其他挥发性碳氢化合物; 载气为氦气。第二柱连接到电子捕获检测器 (ECD) 上, 用于测量 N₂O; 载气为氮气。

土壤微生物群落状态附加参数微生物生物量

碳 (Cmic) 的计算方法为:

$$\text{Cmic} (\mu\text{g C/g}) = \text{SIR} [\mu\text{L CO}_2 / (\text{g} \cdot \text{h})] \times 40.04 + 0.37 \quad (1)$$

为了估算土壤微生物群落的比活性, 代谢熵 ($q\text{CO}_2$) 以 BR 与 Cmic 的比值计算。代谢熵是衡量微生物群落基本生理状态的指标 [单位为 $\mu\text{g CO}_2 / (\text{mg Cmic h})$], 表示每单位微生物生物量每小时形成的碳量。

1.5 统计

所有的测量进行 5 次重复。采用 Statistica 10 软件包进行统计分析。所有报告值均以平均值 $\pm$ 标准差表示。对于每组分析, 为了确定差异的显著性, 采用单因素方差分析 (ANOVA) 进行差异比较。采用 Fisher's LSD 检验确定处理之间的差异。

所有显著性检验均在 $P < 0.05$ 水平进行。

2 结果

2.1 N-NH_4 、 N-NO_3 含量和土壤 pH

初始未经处理的土壤 N-NH_4 含量非常低 (低于 1 ppm), 而施用 180 ppm N 的尿素可显著增加土壤中水溶性 N-NH_4 的含量 (图 1a)。U 处理可使 N-NH_4 含量达到 2.3 mg/kg, U-HA 可使 N-NH_4 含量达到 3.5 mg/kg。正如预期的那样, 在使用 U-UI 的处理中观察到 N-NH_4 的最大积累。U-UI 通过抑制酶的活性, 减少了尿素的分解, 从而减少了气态 NH_3 形式的氮素损失。因此, 尿素中的氮更充分地转化为 NH_4^+ , 并与土壤组分结合。

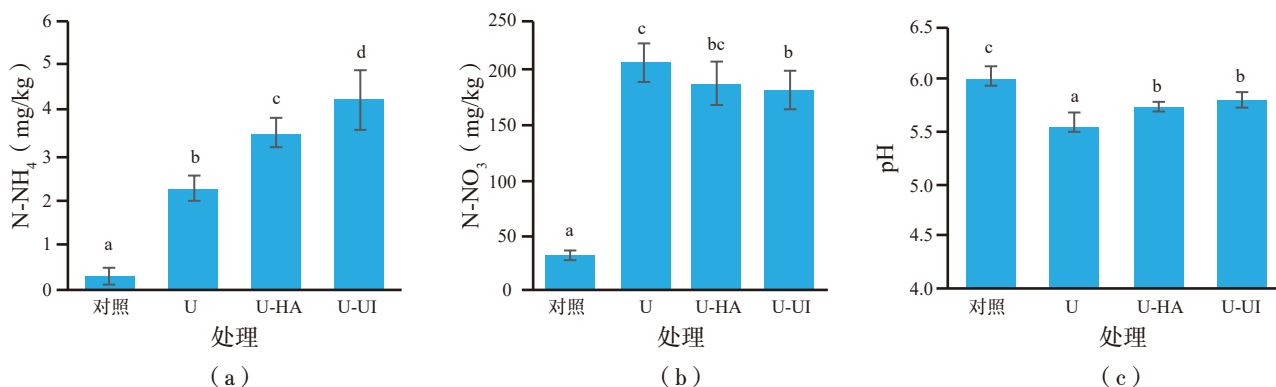


图 1 尿素肥对水溶性 N-NH_4 (a)、 N-NO_3 (b) 和 pH (c) 含量的影响

Fig.1 Effect of urea fertilizers on the content of water-soluble N-NH_4 (a), N-NO_3 (b), and pH (c)

注: 不同字母表示处理间差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 下同。

由于在试验过程中发生了强烈的硝化反应, 大部分氮素被转化为 N-NO_3 (表 1)。从绝对值来看, 水浸提液中 N-NO_3 含量以 U 处理最高, U-HA、U-UI 处理较低 (图 1b)。根据 LSD 检验, 与 U 处理相比, U-HA 和 U-UI 处理的 N-NO_3 积累量更低, 且 U-HA 和 U-UI 处理之间没有显著差异。

硝化微生物将 N-NH_4^+ 主动转化为硝酸盐, 与对照相比, 所有尿素处理的土壤 pH 降低了 0.2 ~ 0.5 个单位 (图 1c)。这种效果在 U 处理中表现得最为明显, 而使用 U-HA 和 U-UI 处理对土壤酸度的提升作用较小, 特别是 U-UI 处理最小。

2.2 气态氮损失

在本试验中, 土壤的氨化和硝化作用表现强烈, 施入氮素中有很大一部分以 N-NO_3 的形式积累。因此, 氮素损失最主要来源是微生物反硝化细菌活性导致的 N_2O 排放。

施用尿素之后, 以 N_2O 形式损失的氮素显著增加 (图 2a)。在所有尿素处理的样品中, U-HA 处理的 N_2O 排放速率最低, 比 U 处理减少 50%, 差异具有统计学意义。所有尿素处理使潜在的反硝化活性降低约 30% (图 2b)。这是在 22 天试验过程中, 土壤条件和微生物演替模式变化的结果。由于未观察到 U-HA、U-UI 和 U 处理之间的



差异，因此可以得出结论，即使在最有利于反硝化的条件下，U-HA 处理也不会向大气中排放更多的 N_2O 。在自然条件下， N_2O 实际排放速率可能显著低于使用 U 或 U-HA 和 U-UI 组合处理。

表 1 尿素对 $N-NH_4$ 、 $N-NO_3$ 含量（按施氮量归一化）和 N_2O 实际排放速率（以 U 处理土壤的 %）的影响
Tab.1 Effect of urea fertilizers on content of $N-NH_4$, $N-NO_3$ (normalized by the amount of applied N), and actual N_2O emission rate (as % of U-treated soil)

处理	$N-NH_4$	$N-NO_3$	$N-N_2O$
对照	NA ¹	NA ¹	9.6
U	1.25	97.2	100.0
U-HA	1.93	88.2	50.1
U-UI	2.34	85.5	89.7

注：NA¹ 不适用。

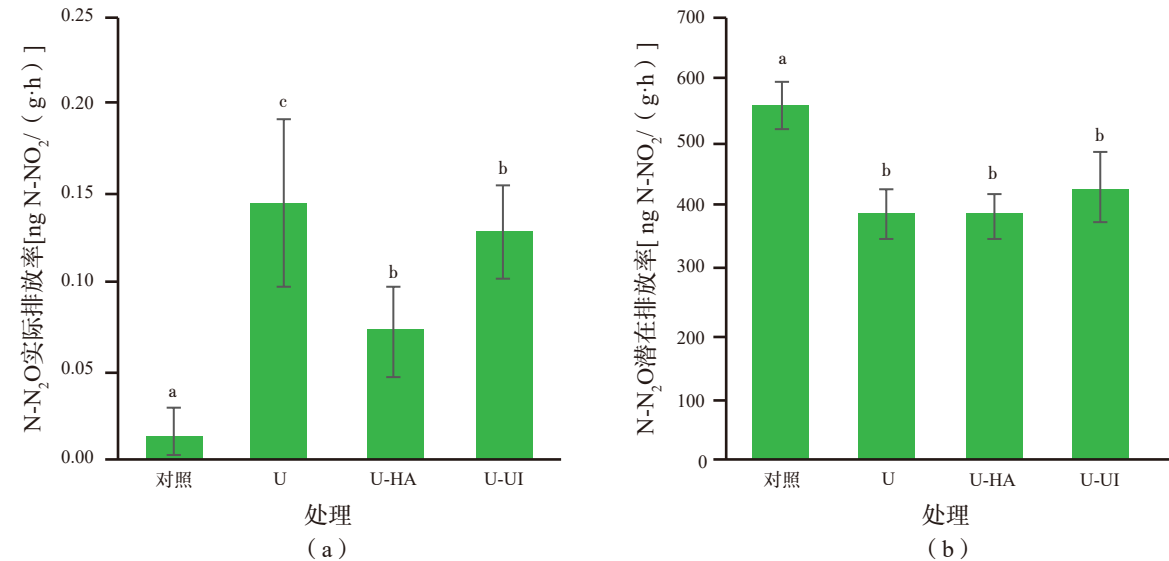


图 2 尿素对 N_2O 实际 (a) 和潜在 (b) 排放速率的影响
Fig.2 Effect of urea fertilizers on actual (a) and potential (b) N_2O emission rates

2.3 土壤微生物群落活性

施用矿物肥料不可避免地引起土壤生物活性水平的深刻变化，从而影响亲生物元素的生物化学转化过程和速率。在本试验中，所有供试尿素的施用导致土壤 CO_2 排放速率（土壤基础呼吸 BR）从对照的 $468 \text{ ng C-CO}_2 / (g \cdot h)$ 减少到 $343 \sim 395 \text{ ng C-CO}_2 / (g \cdot h)$ （图 3a）。U 处理的这种效应表现得最为明显，而 U-HA 和 U-UI 处理的效果略微减轻。

在施用尿素时，BR 的降低也与土壤 pH 的降低有关（图 1c）。U 处理的酸化升高幅度最大，反过来，这也导致 BR 的下降幅度也最大，而其他

2 种肥料处理，尤其是 U-UI 处理对微生物活性的抑制作用较小。结果表明，U-HA 处理土壤微生物群落活性（以 BR 表示）高于 U 处理，并与 U-UI 处理相同。

与对照相比，所有尿素处理的样品中土壤微生物生物量碳的数量都较低（图 3b），这可能是由于在提供氮素营养的同时，增加了对可用碳源的竞争。

除生物量本身外，微生物代谢熵（呼吸与生物量的比值），即 qCO_2 ，是反映土壤微生物群落状态和比活性的重要定性特征。在本试验中， qCO_2 值在 $0.72 \sim 0.77 \mu g CO_2 / (mg Cmic h)$ 范围

之间（图 3c）。虽然不同处理间的差异没有统计学意义，但在趋势水平上， $q\text{CO}_2$ 受 U 和 U-UI 的影响显著降低。另一方面，随着腐植酸包膜尿素的应用，微生物生物量的功能活性水平保持在对照值的水平。

由图 3d 可以看出，初始土壤的乙烯（ C_2H_4 ）排放速率为 $0.4 \text{ ng C-C}_2\text{H}_4/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。 C_2H_4 被认为是最重要的植物激素之一，即使在低浓度时，也会对植物的生长发育有显著影响。根据 Arshad 和

Frankenberger 的研究，土壤真菌和细菌也会产生足够的 C_2H_4 来触发生理反应。然而，人们对 C_2H_4 介导的土壤微生物和植物之间相互作用的具体机制知之甚少。虽然 N-NH_4 不影响甚至不足以促进土壤中的 C_2H_4 合成，但已知硝酸盐会对其产生不利影响。在试验中，我们没有观察到 C_2H_4 的释放量与硝酸盐浓度的关系；然而，应该注意到的是，在 U-HA 和 U-UI 的影响下， C_2H_4 排放速率比对照减少了一半。

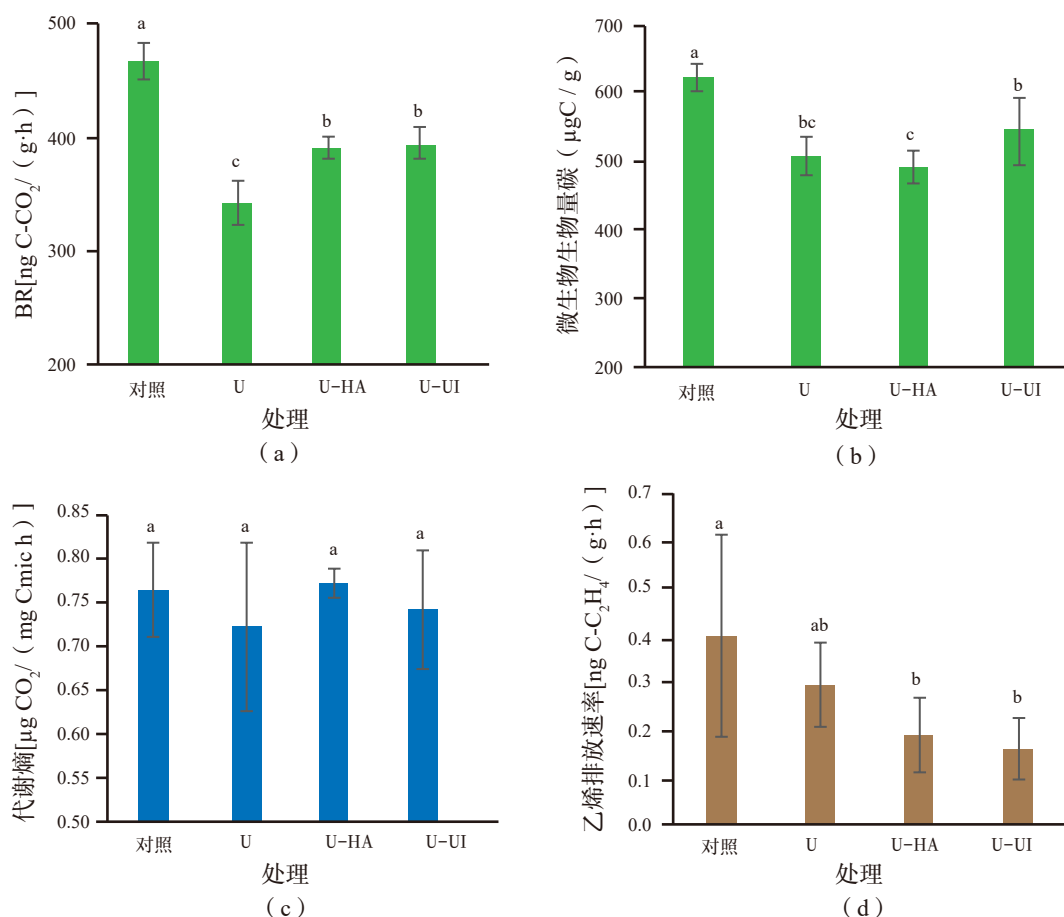


图 3 尿素对土壤基础呼吸 (a)、微生物生物量碳 (b)、代谢熵 $q\text{CO}_2$ (c) 和乙烯排放速率 (d) 的影响

Fig.3 Effect of urea fertilizers on soil basal respiration (a), microbial biomass C (b), metabolic quotient $q\text{CO}_2$ (c), and ethylene emission rates (d)

3 讨论

本试验研究了 3 种尿素肥料 (U、U-HA 和 U-UI) 对土壤中氮素转化的影响。在给定的试验条件下，与 U 处理相比，后 2 种处理的 N-NH_4 积

累和 N-NO_3 生成减少。

将获得的数据以施氮量的百分比表示，可以更清楚地了解发生的过程（表 1）。腐植酸包膜的存在促进了氨的固定，水浸提态 NH_4^+ 含量的增加证明了这一点。虽然与 U-UI 处理相比，这种效果不



显著，但绝对显示出积极的趋势。这种机制可能是由于腐植酸的化学性质，主要是位于外围部分的羧基和酚基，促进了阳离子的结合，从而将其固定在土壤中。

在土壤中，尿素随着硝酸盐离子的形成而迅速发生硝化作用。硝化速率取决于土壤水分、养分含量和土壤生物活性。在本试验中，初始土壤条件有利于硝化作用，施入氮素的 86% ~ 97% 转化为 N-NO_3 （表 1）。在 U 处理中， N-NO_3 的比例最高（97%）；而 U-HA 处理与 U-UI 处理接近，分别

为 88% 和 86%。这一事实表明，在腐植酸包膜的影响下，尿素的硝化速率降低。

活性硝化作用可能是单独施用 U 处理土壤 pH 下降的主要原因（图 1c）。通常情况下，在施用尿素后的第 1 天，土壤 pH 随着碱性碳酸铵盐 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 的形成而上升。之后，由于铵的硝化作用和随后形成的亚硝酸盐和硝酸盐，碱化被酸化所取代。可见，腐植酸的存在降低了硝化速率，从而减轻了土壤酸化。反过来，较低的酸度更有利于维持土壤生物活性水平，BR 值较高（表 2）。

表 2 尿素对土壤微生物参数的影响
Tab.2 Effect of urea fertilizers on soil microbiological parameters

处理	BR	SIR	Cmic	乙烯
对照	100.0	100.0	100.0	100.0
U	76.8	81.7	81.8	75.3
U-HA	85.1	79.0	87.3	46.9
U-UI	81.0	87.2	79.0	40.9

为了更清楚地了解 N_2O 实际排放速率，我们采用 U 处理的排放值 $[0.145 \text{ ng N-N}_2\text{O}/(\text{g}\cdot\text{h})]$ （图 2a）] 为 100%。从表 1 可以看出，与 U 处理相比，U-HA 处理下的 N_2O 排放速率急剧减少，气态氮素损失达到最小值，甚至低于 U-UI 处理。在大多数自然条件下也会观察到类似的情况。这种效应可能与腐植酸的高疏水特性有关，腐植酸包裹尿素颗粒，从而降低了尿素溶出速率和随后由土壤中硝化和反硝化原核微生物群落对后续微生物转化氮素的可利用性。

所有结果都支持尿素的腐植酸包膜类似于天然硝化抑制剂的假设。我们认为这是一种趋势，可以稳定施用铵，并降低其氧化为硝酸盐的速率，然后通过土壤径流和气体损失去除后者。可以假设，在生物活性较低的土壤中，如沙质或低 HSs 土壤，这种模式可能会更明显地表现出来。

此外，尿素颗粒上腐植酸的浓度也很重要，因为脲酶活性抑制率与添加腐植酸的比例呈正相关。根据已发表的数据，腐植酸尿素中腐植酸的最佳比例可能在 0.2% ~ 15% 之间变化。一些研

究表明，尿素与富含腐植酸的褐煤混合，可以通过将褐煤比例提高至 65%，最大限度地减少矿物氮的损失。同时，需要注意的是，腐植酸在 50 ~ 500 mg/kg 时对植物生长具有促进作用，但在 1000 ~ 4000 mg/kg 时对植物生长有抑制作用；因此，应该研究 HSs 对尿素的最佳比率。

所有供试尿素对土壤中碳的微生物转化均有影响。与对照相比，土壤微生物基础呼吸降低了 14% ~ 23%（表 2）。这些变化可能与微生物群落组成的演替变化相关以及对容易获得的有机质的竞争加剧导致的微生物生物量减少有关。生物量测量已被用于早期指示土壤有机质含量因土壤管理变化而发生的变化。U-HA 处理对微生物群落的功能更温和，有利于土壤有机质的稳定，因为与对照相比，该处理的生物量和基础呼吸下降较小，代谢熵也没有变化。在进一步的研究中，还应注意使用 U-HA 和 U-UI 后，对土壤 C_2H_4 排放速率的抑制作用增强。 C_2H_4 虽然不是温室气体，但它是一种重要的生理活性物质，其在土壤孔隙空间和大气近表层浓度的增加会影响栽培植物的生长



和发育,并最终影响产量。

4 结论

在本试验中,与 U 相比,U-HA 在减少土壤氮素损失方面具有一定的优势,它促进了氨的非生物固定,防止了尿素引起的土壤酸化,减少了硝化作用和 N_2O 的排放。微生物生物量也保持更稳定,其功能受到的干扰较小。

值得注意的是,这些影响除了具有农业价值外,对环境也很重要。氨和 N_2O 的排放不仅会导致氮肥的非生产性损失,而且还会造成不利的环境后果,加剧全球温室效应。

与 U-UI 处理相比,U-HA 处理的结果介于 U-UI 和 U 处理之间。同时,一些土壤生物活性指标显示 NBPT 对土壤生物有潜在的负面影响。因此,与 U-HA 处理和对照土壤相比,代谢熵 $q\text{CO}_2$ 较低,表明 NBPT 可能对土壤生物的其他功能产生非特异性的负面影响。考虑到 U-HA 的效果与 U-UI 的效果趋势相同,并且考虑到腐植酸原料的成本较低,

使用 U-HA 在经济上是可行的。

然而,有必要考虑的是,观察到的趋势在本试验特定条件下是有效的。本试验中所使用的淋溶土壤的特点是具有较高的生物活性,pH 呈中性,并在 22 °C 恒定光照下进行的。可以假设,在其他试验条件下,尿素与其他浓度的腐植酸或在其他土壤和生物气候条件下,揭示的模式可能更明显。针对不同土壤的这一问题的进一步研究。因此,在低 HSs 沙质土壤和氨挥发剧烈的干旱地区,尿素颗粒表面的腐植酸包膜不仅可以作为脲酶抑制剂,还可以改善土壤 HSs 状态。在硝酸盐淋溶和 N_2O 排放旺盛的湿润地区,腐植酸包膜尿素也将有助于减少这些负面影响。尽管与合成 UI 相比,U-HA 效果不那么明显,但使用这种产品可以被认为减少农业化学负荷的一种工具,也是迈向“绿色”农业的一个步骤。

基金、致谢、参考文献等(略)

译自: *Agronomy*, 2023, 13: 1958。

(上接第 45 页)复配效果最好。

本试验在不同来源壳寡糖产品比较试验中,与空白对照相比,各壳寡糖产品对小麦幼苗苗高、主根长的影响没有达到显著的促进作用,但与腐植酸复配后,虽然浓度降低了,对小麦苗高和主根长的促进作用达到了显著差异。在本试验中,初步筛查了壳寡糖与腐植酸复配的最佳比例,但没有发现壳寡糖与腐植酸复配对小麦幼苗株高和根系生长呈现出较为明显的规律。

下一步,在本试验基础上,需要深入开展壳寡糖与腐植酸复配对小麦全生育期的影响、对小麦产量和品质的影响、对小麦抗性的影响等系统研究,以为二者复配在小麦种植中大面积推广应用提供参考。

参考文献

[1] 谢尚强,王文霞,张付云,等.植物生物刺激素研究

进展[J].中国生物防治学报,2019,35(3):487~496.

[2] 李炳言,宋大利,王秀斌,等.不同生物刺激素对玉米生长及土壤微生物群落结构的影响[J].植物营养与肥料学报,2023,29(11):2172~2180.

[3] 应学兵,姜淑芳,高源,等.高钾型水溶肥配施生物刺激素对茄子生长及品质的影响[J].北方园艺,2023(14):1~7.

[4] 林家欣,陆苑莹,伏广农,等.不同生物刺激素对水培上海青产量及品质的影响[J].农业工程技术,2023,43(6):11~15.

[5] 黄哈达,韩效钊,梅万付,等.4种生物刺激素对韭菜种子萌发及幼苗生长的影响[J].天津农林科技,2020(5):13~15,18.

[6] 张桂娟,林雪,陈虹,等.生物刺激素在春季花椰菜上的应用研究[J].蔬菜,2020(5):26~31.

[7] 夏萱.一种海洋寡糖复合植物生长调节剂的研究[D].中国海洋大学硕士学位论文,2012.