



## 腐植酸尿素制备工艺及应用研究进展

肖广敏<sup>1</sup> 侯升林<sup>1</sup> 李东昊<sup>2</sup> 王 策<sup>1</sup> 杨亚娴<sup>3</sup> 茹淑华<sup>1</sup> 孙世友<sup>1\*</sup>

1 河北省农林科学院农业资源环境研究所 / 河北省肥料技术创新中心 /

农田环境修复河北省工程研究中心 石家庄 050051

2 安新县农业农村局 雄安新区 071600

3 大名县农业农村局 邯郸 056900

**摘 要:** 腐植酸尿素作为一种新型增效氮肥, 在提升氮素利用率、减少氮素损失与促进作物增产等方面具有显著潜力, 受到国内外学者的广泛关注。然而, 受腐植酸原料复杂性及作用机理系统性研究不足的制约, 其制备工艺优化与大规模应用仍面临挑战。本文系统综述了腐植酸尿素的主要制备工艺, 阐明了其在土壤—作物系统中的氮素缓释与增效机理, 综合评估了其增产、提效与减排效果, 进而剖析当前产业化与推广应用中的关键问题, 提出未来研究重点与发展对策, 以期为腐植酸尿素的技术创新与产业可持续发展提供参考。

**关键词:** 腐植酸尿素; 制备工艺; 作用机制; 农业应用

**中图分类号:** TQ444.6      **文章编号:** 1671-9212(2025)06-0037-10

**文献标识码:** A      **DOI:** 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2025.06.003

### Research Progress on the Preparation Process and Application of Humic Acid Urea

Xiao Guangmin<sup>1</sup>, Hou Shenglin<sup>1</sup>, Li Donghao<sup>2</sup>, Wang Ce<sup>1</sup>, Yang Yaxian<sup>3</sup>, Ru Shuhua<sup>1</sup>, Sun Shiyu<sup>1\*</sup>

1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Science/Hebei Fertilizer

Technology Innovation Center/Hebei Engineering Research Center for

Farmland Environmental Restoration, Shijiazhuang, 050051

2 Anxin Agricultural and Rural Bureau, Xiong'an New Area, 071600

3 Daming Agricultural and Rural Bureau, Handan, 056900

**Abstract:** Humic acid-urea (HAU), an innovative synergistic nitrogen fertilizer, has garnered significant attention from researchers worldwide owing to its remarkable potential to improve nitrogen use efficiency (NUE), reduce nitrogen losses and boost crop yields. However, challenges in optimizing production processes and scaling up agricultural applications persist, primarily due to the heterogeneous nature of humic acid sources and insufficient systematic research on their mechanisms of action. This review systematically elaborated on the primary production routes of HAU, clarified its mechanisms for nitrogen slow-release and synergy in the soil-crop system, and comprehensively evaluated its effects on yield enhancement, efficiency improvement and emissions reduction. Furthermore, it critically examined key issues in current industrialization, proposed future research priorities and development strategies to advance technological innovation and sustainable industrial development in HAU.

[基金项目] 2024 年河北省省级科技计划“设施蔬菜氮磷增效减损增值肥料研制及应用”(项目编号 24466901D); 2025 年河北省现代农业产业技术体系旱碱麦创新团队建设专项。

[收稿日期] 2025-09-09

[作者简介] 肖广敏, 男, 1989 年生, 副研究员, 研究方向为农业资源环境, E-mail: xgm8945491@163.com。\* 通讯作者: 孙世友, 男, 研究员, E-mail: sunshiyu@126.com。

Key words: humic acid urea; production process; mechanism of action; agricultural application

氮素是植物生长必需的营养元素,在农业生产过程中对于农作物生长具有至关重要的作用<sup>[1]</sup>。氮肥是农作物生长过程中的主要氮素来源,氮素的施用对于提高作物产量和品质十分重要<sup>[2]</sup>。尿素是农业生产上应用范围最广用量最大的氮肥,是一种重要的农业生产资料<sup>[3]</sup>。然而,目前中国农田氮素利用率仅 45% ~ 50%,大量的氮通过淋失、径流、气体排放进入环境,引发地表水富营养化、地下水硝酸盐超标等问题<sup>[4]</sup>。为解决这一问题,发展高效环保的新型尿素已成为肥料行业的研究热点。

腐植酸是一种高活性的腐殖质,由各种苯环通过桥键相连,其上富含羧基、酚羟基、羰基等多种官能团,这些活性官能团可以抑制土壤脲酶活性减缓尿素在土壤中的分解速度减少尿素损失提高肥效<sup>[5]</sup>。将尿素与腐植酸通过一定工艺加工形成腐植酸尿素能够实现“1+1 > 2”的协同效应,在改善土壤提高肥料利用效率和作物产量方面展现出巨大的应用潜力<sup>[6]</sup>。在全力实行减肥增效和“双碳”战略的大形势下,腐植酸尿素在农业生产领域具有广阔的应用前景。本文系统概述了腐植酸尿素的制备方法,腐植酸尿素的增效机制,腐植酸尿素的应用效果及腐植酸尿素产业发展面临的问题和挑战并对未来发展方向提出展望,以期对腐植酸尿素产业发展和减肥增效方案提供参考。

## 1 腐植酸尿素制备工艺

### 1.1 腐植酸原料活化与改性

腐植酸的预处理与活化是制备腐植酸尿素不可或缺的首要环节。腐植酸活化是使腐植酸分子量变小或在其分子构架上增加活性基团的过程,活化的目的不仅是提高腐植酸的提取率和溶解度,更是为了激活其分子结构中的活性官能团,增强其与尿素的作用能力和最终的生物刺激活性<sup>[7]</sup>。目前实现腐植酸活化共有 3 种途径,一是在腐植酸原来的结构上增加活性官能团,二是通过引入原子或原子团

来激活或提高腐植酸的反应能力,三是通过切断化学键降低腐植酸分子量使其成为结构简单的物质<sup>[8]</sup>。目前可以通过物理活化、化学活化和生物活化法实现以上 3 种途径达到活化腐植酸的目的<sup>[9]</sup>。

#### 1.1.1 物理活化法

超声波作用于水时可以使水分子形成 OH 和 HO<sub>2</sub> 自由基,OH 自由基降解腐植酸大分子基团使腐植酸碎片化,HO<sub>2</sub> 自由基继续深入氧化,最终使腐植酸的芳香结构减少,增加酚羟基和醌基,从而达到活化腐植酸的目的<sup>[10]</sup>。有研究发现超声波活化腐植酸的效率与水添加量、超声波功率时间均呈正相关关系,且当水煤比 8 : 1、超声波功率 200 W、超声时间 25 min 时为超声波活化腐植酸的最佳条件<sup>[11]</sup>。

机械活化是利用机械振动对制备腐植酸的矿物原料进行粉碎,在此过程中弱化学键发生断裂,腐植酸分子量变小溶解性提高最终达到活化腐植酸的目的<sup>[12]</sup>。

#### 1.1.2 化学活化法

碱溶酸析法是利用离子交换原理,使腐植酸的含氧官能团与碱类物质反应生成可溶性腐植酸盐,再通过调节溶液 pH 使其固液分离达到活化的目的<sup>[13]</sup>。有研究发现,以风化煤为原料时活化腐植酸的最佳条件为 NaOH 浓度 0.8 mol/L,反应时间 60 min,固液比 1 : 12,18% 盐酸反应时间 25 min<sup>[14]</sup>。氧解法是通过增加腐植酸含氧官能团数量活化腐植酸,其难易程度取决于腐植酸结构,在反应过程中长链脂肪结构、氢化芳香结构以及醚、酯键可被氧化成羰基和羧基结构,芳环中的酚结构氧化成醌<sup>[15]</sup>。有研究利用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 与褐煤腐植酸进行反应,发现反应时间 24 h、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度 20%、液固比 0.8 mL/g 为最佳反应条件<sup>[16]</sup>。在上述方法活化腐植酸过程中添加催化剂可以显著提高活化率<sup>[17]</sup>。

#### 1.1.3 生物活化法

生物活化通过将特定微生物接种到腐植酸上,利用微生物的生长代谢分泌到细胞外的生物酶对腐



植酸进行降解, 改变腐植酸的结构和官能团以此来提高腐植酸的活性<sup>[18]</sup>。生物酶通过破坏腐植酸的共价键使腐植酸大分子降解<sup>[19]</sup>。主要使用的生物酶包括木素过氧化物酶、锰过氧化物酶、漆酶等氧化酶和酯酶等非氧化酶<sup>[20]</sup>。

### 1.2 腐植酸与尿素结合的作用机理

腐植酸与尿素的相互作用研究是开发腐植酸尿素的核心科学基础, 腐植酸与尿素间的相互作用并非简单的物理混合, 而是涉及物理、化学等多层次的复杂过程, 最终通过腐植酸与尿素的相互作用实现氮素的增效减排。关于腐植酸与尿素的作用机理目前主要存在 4 种假说: 非交换吸附假说、氢键和自由基反应假说、络合假说和羰(醛)基亲核加成假说<sup>[21]</sup>。非交换吸附假说认为腐植酸大分子通过外围桥键从尿素溶液中以非交换吸附的方式固定

氮素, 这一过程属于化学吸附过程; 氢键和自由基反应假说基于红外光谱分析认为腐植酸与尿素作用的过程中氢键和自由基起到主要作用; 络合假说基于腐植酸与尿素反应过程中产物的状态提出; 羰(醛)基亲核加成假说基于有机含氮碱类物质与腐植酸反应提出, 认为腐植酸与含氮碱类物质反应在羰(醛)上进行。

### 1.3 腐植酸尿素主要制备工艺

腐植酸尿素作为一种高效的肥料, 其制备工艺是实现腐植酸与尿素有效结合并发挥协同增效作用的关键。制备工艺的核心目标在于克服腐植酸本身复杂的物理化学特性, 实现两者在微观尺度上的均匀、稳定结合, 并最大限度地保留腐植酸的生物活性。目前腐植酸尿素的制备工艺包括溶剂法、包裹法和热熔法 3 种, 三者优缺点和适用场景见表 1。

表 1 不同工艺的优缺点和适用场景比较

Tab.1 Comparison of the advantages and disadvantages, and applicable scenarios of different processes

生产工艺	优点	缺点	适用场景
溶剂法	(1) 反应条件温和, 能促进腐植酸与尿素分子水平的结合 (2) 产品水溶性好, 易于被作物吸收	(1) 使用有机溶剂成本高且有安全与环境风险, 工艺流程复杂 (2) 用水作溶剂时干燥过程能耗高, 且需严格控制工艺防止尿素水解	适用于生产高端液体肥或需要高活性水溶腐植酸的场景
包裹法	(1) 操作温度低避免热敏性物质分解 (2) 对原料腐植酸要求相对灵活 (含量 $\geq 50\%$ 即可)	(1) 产品中腐植酸与尿素的化学反应程度可能有限, 影响速效性 (2) 包裹层的均匀性和稳定性对工艺控制要求高, 需添加粘结剂, 可能增加原料成本和工艺复杂性	适用于生产长效缓释肥料, 追求环境友好和农学效益的场景
热熔法	(1) 工艺流程简单, 设备投资较低, 无污染问题 (2) 可直接利用尿素熔融液, 生产效率高	(1) 高温易导致尿素分解, 造成氮损失并产生缩二脲对作物产生毒害 (2) 腐植酸在高温下可能部分分解, 影响其生物活性	适合大规模生产颗粒状腐植酸尿素, 对成本控制要求高的场景

#### 1.3.1 溶剂法

溶剂法以有机溶剂 (甲醇、乙醇、丙酮) 或者无机溶剂 (水) 为介质生产腐植酸尿素。以有机溶剂作为介质生产腐植酸尿素的工艺需采用高压设备, 其反应条件较为苛刻, 其在腐植酸尿素生产的过程中加入的有机溶剂多具有毒性, 因此此法未能进行大规模工业化应用<sup>[22]</sup>。使用水作为介质生产

腐植酸尿素工艺条件要求较简单, 仅以水和少量添加剂作介质减少污染, 在常压和 90 ~ 100 °C 温度就可以发生反应<sup>[23]</sup>。在该工艺的基础上程亮等<sup>[24]</sup>开发了低温腐植酸尿素的制备工艺, 以水为溶剂, 反应温度仅为 47.6 °C, 反应时间 1.81 h, 活化剂为质量浓度是 50% 的十二烷基硫酸钠, 固液体摩尔比 9 : 1, 络合剂浓度 0.14 mol/L, 腐植酸尿素产



率达到 90.6%。

### 1.3.2 包裹法

包裹法通过黏结剂将腐植酸包裹在尿素表面形成一层较稳定的半透性包裹膜，其原理并非追求腐植酸与尿素在分子水平上的化学合成，而是通过物理机械方式，构建一个“尿素核-腐植酸壳”的异粒结构<sup>[23]</sup>。腐植酸包裹层在土壤中遇水会吸水膨胀形成半透性的物理屏障，可以减缓水分向内核的渗透速率，从而延缓内部尿素晶体的溶解和后续的水解过程，为氮素的缓慢释放提供了初始的物理阻隔<sup>[25]</sup>。姜剑平等<sup>[26]</sup>研究了包涂比、包涂方法、干燥温度、烘干方式等参数对腐植酸尿素制备的影响，确定了最佳参数为腐植酸适宜用量为尿素量的 5% ~ 20%，包涂方法为转鼓式包涂，干燥温度为 40 ~ 50 °C，烘干方式为复合振动立式烘干。

### 1.3.3 热熔法

热熔法指尿素在熔融状态下加入腐植酸或腐植酸盐混合后得到腐植酸尿素。熔融状态下的尿素既是溶剂也是反应物，熔融状态下尿素的高流动性确保了腐植酸的均匀分散，而高温则激发了腐植酸活性官能团（如羧基、酚羟基）与尿素分子之间的络合、螯合甚至缩合反应<sup>[27]</sup>。该工艺易于集成到现有尿素生产线的蒸发造粒系统中，通过增设混合槽和计量給料装置即可实现，投资少改造简便，非常适合大规模工业化生产。

## 2 腐植酸尿素减肥增效机理

### 2.1 腐植酸调控土壤中尿素转化过程

腐植酸可以与尿素络合形成腐植酸尿素肥料，与尿素配施腐植酸相比使腐植酸与尿素结合更紧密，提高尿素氮的利用率<sup>[28]</sup>。腐植酸尿素的增效机理是一个涉及土壤化学、微生物学和植物生理学的复杂过程。其核心在于腐植酸与尿素的协同效应，通过“控失、促效、改良”三位一体的方式，显著提高氮肥利用率<sup>[29]</sup>。土壤氮素损失主要是以氨挥发和氮淋溶形式发生的，腐植酸可以通过减少氮素损失提升氮素利用效率<sup>[30]</sup>。尿素施入土壤后在脲酶作用下迅速水解为不稳定的碳酸铵，导致局部

pH 升高从而引发氮素以氨挥发形式损失。脲酶的活性中心含有镍离子和特定的氨基酸残基，腐植酸分子结构中的醌基、酚羟基、羧基等官能团，能够与脲酶活性中心的镍离子发生螯合反应，或者与酶蛋白的特定基团结合堵塞脲酶对尿素水解的活性位置，使其无法正常进行催化反应，减缓尿素进入土壤后的水解速度，从而从源头上大幅减少氨挥发损失<sup>[31]</sup>。腐植酸具有较高的酸性和吸附能力，可以通过减缓尿素施入后局部 pH 变化和吸附  $\text{NH}_4^+$  降低氨挥发量<sup>[32]</sup>。

尿素施入土壤后会提供氮源刺激土壤中的氨氧化细菌增加其相对丰度，尿素水解产生的铵态氮在硝化细菌作用下会转化为硝态氮，由于硝态氮本身带负电不易被土壤胶体吸附，极易通过淋溶的方式损失<sup>[33]</sup>。腐植酸能选择性抑制氨氧化细菌的活性，延缓硝化过程，使氮素更长时间以吸附性强的铵态氮形式保存在土壤中从而减少氮素以硝态氮形式淋溶损失<sup>[34]</sup>。腐植酸既通过直接作用（竞争活性位点）来影响脲酶活性，也通过间接途径（调控微生物）最终达到减少氮素损失的目的。

### 2.2 腐植酸刺激作物生长

在减少氮素损失的同时腐植酸还可以作为植物生长刺激素刺激作物生长，增加作物对氮素的吸收，达到增加氮素利用率的目的。研究表明腐植酸分子中的某些组分能够模拟植物内源激素（生长素）的作用，激活根系中与细胞分裂和伸长相关的基因导致侧根和根毛的数量、长度及密度显著增加<sup>[35]</sup>。研究表明腐植酸可以通过激活根中质膜  $\text{H}^+$ -ATPase 的活性，使根系细胞向细胞外泵出  $\text{H}^+$ ，使根际微区酸化同时产生膜电位差，为  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$  等阳离子的共转运提供驱动力，从而促进养分主动吸收，进而增加作物产量<sup>[36]</sup>。施用腐植酸尿素可显著提高根系长度直径和表面积，增加超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性和可溶性蛋白含量，提高作物的抗逆性促进根系对营养物质的吸收<sup>[37]</sup>。腐植酸还可促进编码硝酸盐转运体的基因表达，增强硝酸还原酶活性促进作物对氮素的吸收，提高植株体内关键代谢酶的活性加速无机氮向氨基酸、蛋白质等有机氮的转化改善氮代谢<sup>[38]</sup>。除促进根系生长增



强氮素吸收外,也有研究发现施用腐植酸可增加叶面积系数和叶绿素含量,同时腐植酸能有效提高作物光能捕捉能力,加速光能的吸收、转移和转化,促进植物光合作用,从而增加产量间接增加对氮素的吸收<sup>[29]</sup>。

### 2.3 腐植酸改善土壤结构

最后腐植酸可以通过改善土壤结构促进土壤的保肥能力和微生物活性提高氮素利用效率。土壤有机质是影响土壤质量的重要因素之一,随着土壤有机质含量升高,土壤养分供应能力及微生物活性也升高<sup>[39]</sup>。腐殖质是生物残骸经历长时间生物物理化学过程形成的一种包含 C、H、O、N 等元素的有机聚合物<sup>[40]</sup>,其占土壤有机质含量的 75% 是土壤有机质的最主要成分<sup>[41]</sup>。腐植酸是一种高活性的腐殖质,含有大量有机胶体物质,进入土壤后可以通过粘结作用将土壤颗粒粘结在一起,促进土壤大团聚体的形成,增强土壤团聚体稳定性,改善土壤结构<sup>[42]</sup>。研究发现腐植酸可以促进氮素从大团聚体向微团聚体转移,增强土壤团聚体对氮素的物理保护进而提高土壤的固氮能力<sup>[43]</sup>。腐植酸为土壤微生物活动提供了碳氮底物,其输入能显著刺激有益微生物(如固氮菌、解磷菌)的活性,微生物自身生长吸收了部分氮素固定在体内,随着微生物死亡这部分氮素重新释放到土壤中从而形成一个氮素缓释库,增加了氮素的利用效率<sup>[44]</sup>。

综上,腐植酸尿素的增效非单一作用,而是通过化学抑制减少损失、生理调控促进吸收、结构改良增强固氮的协同闭环,最终实现减肥、增效、减排的多重目标。

## 3 腐植酸尿素在农业上的应用

### 3.1 腐植酸尿素对作物产量、氮素利用效率和品质的影响

#### 3.1.1 对主要粮食作物产量和氮素利用效率的影响

孙克刚等<sup>[45]</sup>研究表明,与施用普通尿素相比,施用腐植酸尿素可以增加小麦产量达 753.2 kg/hm<sup>2</sup> (11%) 并增加氮素利用效率 11.97 个百分点。在玉米上的应用效果表明,施用不同类型腐植酸

尿素比施用普通尿素可以提高玉米百粒重 0.61 ~ 3.04 g (2.14% ~ 8.94%), 增加玉米产量 741 ~ 1579.5 kg/hm<sup>2</sup> (6.72% ~ 14.32%), 增加氮素利用率 2.57 ~ 17.13 个百分点<sup>[46]</sup>。对于南方主要粮食作物水稻施用腐植酸尿素比普通尿素产量增加了 930 kg/hm<sup>2</sup> (11.96%), 氮素利用效率增加了 15 个百分点<sup>[47]</sup>。

#### 3.1.2 对经济作物产量、品质和氮素利用效率的影响

腐植酸尿素在经济类作物上同样表现出显著的增产、提质和提高氮肥利用率的效果。在新疆棉田上应用不同类型腐植酸尿素可以提高棉花产量 201 ~ 405 kg/hm<sup>2</sup> (3.73% ~ 7.51%), 增加氮肥利用率 4.51 ~ 9.89 个百分点<sup>[48]</sup>。在黄河三角洲盐碱地上的研究结果表明,施用腐植酸尿素可以增加花生产量 848 kg/hm<sup>2</sup> (15.62%)<sup>[49]</sup>。对于重要的糖料作物甘蔗施用腐植酸尿素可以增加甘蔗产量 1650 kg/hm<sup>2</sup> (18.18%), 同时在甘蔗的品质方面,施用腐植酸尿素可以增加甘蔗糖分 (1.24%) 和理论糖产量 (3430 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[50]</sup>。

#### 3.1.3 对果蔬类作物产量、品质和氮素利用效率的影响

在常见的蔬菜黄瓜和番茄种植中也有关于腐植酸尿素施用效果的研究。施用腐植酸尿素能提高番茄产量 2270 kg/hm<sup>2</sup> (4.87%), 同时提高了番茄的 Vc 和可溶性糖含量<sup>[51]</sup>。腐植酸尿素显著增加了黄瓜产量 39640 kg/hm<sup>2</sup> (29.74%), 同时增加氮素利用效率 15 个百分点<sup>[52]</sup>。

### 3.2 腐植酸尿素对土壤 NH<sub>3</sub> 挥发和氮淋溶的影响

在腐植酸尿素的增效机理中提到腐植酸尿素通过减少氮素氨挥发和氮淋溶损失增加氮素利用率,这一点也在众多田间试验中得到验证。有研究以水稻秸秆为原料,通过水热反应制备人工腐植酸后,通过热熔法制备腐植酸尿素,在 4 种不同土壤小麦玉米轮作体系中施用这种腐植酸尿素与普通尿素对比发现,腐植酸尿素分别减少了 14.92% ~ 19.94% 的 NH<sub>3</sub> 挥发和 38.31% ~ 54.65% 的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 淋失<sup>[31]</sup>。Shen 等<sup>[53]</sup> 将 1% 的腐植酸与 99% 的熔融的尿素混合制备成粒径 4 mm 的腐植酸尿素颗粒,与施用普通尿素相比,这种腐植酸尿素颗粒的施

用分别降低了 9.70% 的  $\text{NH}_3$  挥发和 40.48% 的  $\text{N}_2\text{O}$  排放。Kong 等<sup>[54]</sup> 研究发现, 腐植酸尿素通过形成稳定复合物、抑制脲酶活性等方式, 可以减慢尿素水解和氮肥转化速率, 同时改善土壤结构增强保水能力, 从而有效减少  $\text{NH}_3$  挥发和氮淋溶, 与施用普通尿素相比, 施用腐植酸尿素可以分别减少氨挥发和氮淋溶 23.07% 和 25.51%。一项田间试验利用大型田间渗漏计精确测定了腐植酸尿素对氮素损失的影响, 研究发现在多年时间里施用腐植酸尿素可减少硝态氮淋溶 38.31% ~ 54.65%, 这主要是因为腐植酸尿素显著提高了作物对肥料氮的吸收<sup>[55]</sup>。李伟等<sup>[56]</sup> 研究发现, 施用腐植酸尿素后在 35 天内显著降低土壤氨挥发 38.41%, 这是因为腐植酸尿素进入土壤后腐植酸可以包裹土壤砂粒使其带有负电荷从而增强吸附铵离子的能力, 减少尿素氨挥发损失。许俊香等<sup>[57]</sup> 研究发现, 腐植酸尿素可减少玉米氨挥发 33.5%, 并显著增加了作物的氮素吸收。土柱模拟研究发现, 腐植酸尿素可减少土壤氮淋溶 14%<sup>[58]</sup>。田间试验结果表明, 与普通尿素相比, 腐植酸尿素可以减少氮淋失量 25.3 ~ 10.9 kg/hm<sup>2</sup> (17.9% ~ 56.1%)<sup>[52]</sup>。

### 3.3 腐植酸尿素对土壤固碳的影响

土壤有机碳是土壤质量和功能的核心, 在供应土壤养分、维持生物多样性和保证生产力等方面发挥着关键作用<sup>[59]</sup>, 提高土壤有机碳含量也被认为是缓解气候变化和提高土壤肥力的双赢策略<sup>[60]</sup>。地球上土壤有机质碳约 3 万亿吨, 其中腐植酸类物质碳占土壤有机质的 80% 左右<sup>[61]</sup>, 目前针对腐植酸和腐植酸尿素施用对土壤有机碳影响的研究越来越多。智燕彩<sup>[62]</sup> 研究发现, 人工腐植酸中富含活性有机碳, 可以在施用初期显著提高土壤活性有机碳组分如溶解性有机碳、易氧化碳和微生物生物量碳的含量。汤春宇<sup>[63]</sup> 在东北黑土研究中发现, 腐植酸中活性碳组分能够促进微生物生长代谢, 并通过冻融环境保存大量的微生物残体以实现土壤中碳的富集, 同时也有助于黑土在冻融期间形成新的且更稳定的金属结合态碳和芳香碳结构。李伟等<sup>[56]</sup> 将腐植酸尿素和普通尿素进行对比发现, 腐植酸尿素在培养条件下显著增加了土壤微生物碳

含量 (80.47%), 说明腐植酸尿素可以增加微生物活性和延长微生物的活性周期。刘艳丽等<sup>[64]</sup> 研究发现, 施用腐植酸尿素对土壤有机碳含量未产生显著影响, 但是施用腐植酸尿素后显著增加了土壤有机碳的矿化速率与累积矿化量, 腐植酸尿素加速了土壤有机碳的矿化。

## 4 腐植酸尿素产业发展的问题与挑战

腐植酸尿素作为一种将传统氮肥尿素与天然有机活性物质腐植酸相结合的新型肥料, 因其具有提高氮素利用率、改良土壤、刺激作物生长、增强抗逆性等多重功效, 而被视为农业绿色可持续发展的重要方向之一。然而尽管其理论优势显著, 且已有部分产品进入市场, 但从实验室研究到大规模产业化推广, 腐植酸尿素的发展仍面临着一系列严峻且相互关联的问题与挑战。这些挑战主要集中于原料来源的复杂性、生产工艺的规范性、作用机理的模糊性等核心层面。

### 4.1 腐植酸原料来源复杂

目前, 腐植酸的生产途径主要有两种, 一种是从天然材料 (褐煤、风化煤) 中采用碱性溶液进行萃取再酸化得到腐植酸<sup>[65]</sup>; 另外一种途径是人工合成腐植酸, 通过模拟加速腐殖化过程将有机废物转化为腐植酸类物质<sup>[66]</sup>。不同来源的腐植酸在分子结构、官能团含量、分子量分布及生物活性上存在天壤之别。即使是同一来源 (如同一矿区的风化煤), 也因其成矿年代和开采层深的不同, 其腐植酸含量和品质也存在极大差异, 而这些差异会造成腐植酸品质不同进而影响制备的腐植酸尿素的品质。目前, 国内外对于肥料用腐植酸原料缺乏精细化的质量分级标准。现行的标准多关注于“腐植酸含量”这一宏观指标, 如《腐植酸复合肥料》(HG/T 5046—2016) 中, 要求检测“活化腐植酸含量”和“总腐植酸含量”, 《含腐植酸尿素》(HG/T 5045—2016) 与《含腐植酸水溶肥料》(NY 1106—2010) 中要求检测“腐植酸含量”。对于腐植酸活性仅通过水溶性腐植酸含量这一单一数值来体现。官能团是腐植酸进行离子交换、络合





(螯合)以及氧化还原反应的基础,其含量越高,化学反应能力越强,因此应将官能团含量作为衡量官能团活性的重要指标之一。这导致下游生产企业难以稳定地采购到优质且均一的原料,无法保证批次间产品的稳定性和肥效的一致性。

#### 4.2 腐植酸尿素生产工艺相对落后

腐植酸尿素生产工艺是实现两者“增效”协同作用的关键。腐植酸尿素生产工艺的理想状态是腐植酸与尿素之间通过氢键、离子交换等作用形成稳定的结合态或络合物,从而延缓尿素在土壤中的水解。但是目前大多数工艺仍停留在“物理包裹”或“浅表结合”的层面,未能真正实现分子水平上深入调控和强化两者间的相互作用。生产工艺的温度、pH、反应时间等关键参数如何影响腐植酸-尿素复合体的形成与稳定性,相关的基础研究严重滞后,使得工艺优化缺乏理论指导,带有很大的经验性和盲目性。

#### 4.3 微观作用机制不清

腐植酸是一种结构复杂的大分子物质,难以对其结构进行准确的表征<sup>[67]</sup>。目前对于腐植酸的分子结构提出了众多模型,被广泛认可的是在1982年由Stevenson提出的模型。Stevenson<sup>[68]</sup>在腐植酸模型中提出典型的腐植酸中存在自由态和结合态的酚羟基,而由N和O作为桥接单元,在腐植酸的芳香环结构上连接着羟基。这种复杂性使得研究其与尿素、土壤微生物、作物根系之间的具体作用机制变得异常困难。目前的研究大多集中于宏观肥效验证(增产率、氮素利用率提升),而对于微观机理,如:腐植酸如何影响脲酶和硝化菌的群落结构与功能,它与尿素分子形成的复合体结构是怎样的,其在细胞和分子水平上如何调控植物的氮代谢基因表达,这些问题大多停留在假说阶段,缺乏直接有力的证据。研究方法上如何将腐植酸的物理效应、化学效应和生物效应分离开来独立研究是方法论上的巨大挑战。

### 5 结论与展望

腐植酸尿素作为传统化肥增值化、绿色化转型

的杰出代表,其通过将无机氮肥与天然有机活性物质腐植酸科学结合,成功构建了“以有机促无机、以无机带有机”的协同增效模式,在实现农业“减肥增效”、推动绿色发展方面展现出巨大且不容忽视的应用潜力与价值。其核心价值在于双向赋能:一方面腐植酸通过物理、化学及生物学途径显著提升了尿素氮的利用率,直接助力于“化肥零增长”目标的实现,从源头上减轻了因氮肥过量施用引发的面源污染问题。另一方面腐植酸自身的土壤改良、保水保肥、刺激生长及增强抗逆等综合功能,能够有效破解长期单一施用化肥导致的土壤板结、有机质下降、生物活性衰退等问题,助力提升农产品品质,体现了“藏粮于地”的战略内涵。因此大力发展和推广腐植酸尿素不仅是减肥增效的技术工具,更是推动农业向资源节约、环境友好、生态协调方向发展的战略抓手,其经济、生态和社会效益十分显著。

为了充分释放这一巨大潜力,未来的研究与推广工作必须朝着更加精准、高效和系统的方向迈进。在理论研究方面应该超越宏观肥效验证,利用分子生物学、微生物组学、现代仪器分析等技术,深入揭示腐植酸与尿素分子间的相互作用机制,明确其在土壤中的转化路径以及对土壤微生物群落结构功能的具体影响。重点回答“何种结构特征的腐植酸活性最强”“如何与尿素实现分子级复合”等核心科学问题,为产品定向研发提供坚实的理论基石。

在产品研制方面突破当前产品同质化瓶颈,基于机理研究成果,开发针对不同土壤障碍(如盐碱、板结、贫瘠)、不同作物营养需求(如粮食作物、经济作物)的专用型高端配方。推动产品从“通用型”向“定制型”升级,例如研发抗盐碱腐植酸尿素、保水型腐植酸尿素以及集成中微量元素和生物刺激素的复合功能型产品,实现“一剂多效”。在推广方面结合智慧农业发展,建立“土壤—作物—气候”大数据库,开发腐植酸尿素施肥专家系统。通过土壤传感器、遥感监测等手段,实现按地块肥力状况和作物需肥规律进行变量精准推荐施肥,彻底改变粗放施用模式,确保其增效潜力在任何田间地头都能稳定、高效地显现出来。

## 参考文献

- [1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259 ~ 273.
- [2] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证—兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 249 ~ 261.
- [3] 薄录吉, 李冰, 李彦, 等. 腐植酸尿素在农业生产和面源污染防治中的研究与应用[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 240 ~ 251.
- [4] Chen B H, Zhang X M, Gu B J. Managing nitrogen to achieve sustainable food-energy-water nexus in China[J]. Nature Communications, 2025, 16: 4804.
- [5] 杨会国, 马丽萍, 张彦彬, 等. 腐植酸接枝共聚物的研究进展及应用前景[J]. 应用化工, 2024, 53(4): 873 ~ 876, 882.
- [6] 张鹏, 俄胜哲, 袁金华, 等. 腐植酸肥料研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(25): 102 ~ 108.
- [7] 李文军, 周大纲. 腐植酸活化技术及其应用[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(3): 20 ~ 23.
- [8] 贺文强, 李斌, 宋剑峰. 矿物源腐植酸的活化[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(1): 19 ~ 21.
- [9] 曲海滨. 不同风化煤腐植酸活化剂及其活化条件对活化率的影响[D]. 山东农业大学硕士学位论文, 2013.
- [10] 刘奇, 杨越超. 风化煤腐植酸的活化工艺及其活化产物的评价研究[J]. 化肥工业, 2019, 46(2): 12 ~ 15, 31.
- [11] 钟世霞, 徐玉新, 骆洪义, 等. 超声波活化风化煤腐植酸的影响研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2014, 45(1): 6 ~ 9, 16.
- [12] 蒋晨义, 吕振娥, 蔡泽宇. 腐植酸活化改性技术在肥料生产中的应用研究[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(6): 50 ~ 52, 55.
- [13] 任麒帆, 刘海飞, 李洋, 等. 浅谈矿物源腐植酸的理化性质、活化提取及应用展望[J]. 腐植酸, 2021(4): 7 ~ 12.
- [14] 郭雅妮, 马畅柠, 惠璠, 等. 风化煤中腐植酸的提取及其性能表征[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 3153 ~ 3160.
- [15] 成绍鑫. 腐植酸类物质的活化与钝化及其在绿色肥料中的应用[J]. 腐植酸, 2003(5): 1 ~ 14.
- [16] 周孝菊, 易芸, 何志艳, 等.  $H_2O_2$  氧解对褐煤腐植酸及含氧官能团的影响[J]. 应用化工, 2016, 45(10): 1869 ~ 1872, 1877.
- [17] 马盼, 张民, 毛新辉. 新型催化剂催化氧化风化煤制备腐植酸[J]. 应用化工, 2016, 45(4): 793 ~ 795, 800.
- [18] 王若楠, 邱小倩, 刘亮, 等. 微生物降解低阶煤的研究及产物腐植酸的应用[J]. 腐植酸, 2017(6): 3 ~ 9, 44.
- [19] Willmannr G, Fakoussa M. Biological bleaching of water-soluble coal macromolecules by a basidiomycete strain[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1997, 47(2): 95 ~ 101.
- [20] Crawford D L. Microbial transformations of low rank coals[M]. Boca Raton: CRC Press, 1992: 50 ~ 62.
- [21] 梁宗存, 成绍鑫. 腐植酸与尿素作用机理研究进展[J]. 腐植酸, 1997(2): 1 ~ 4, 7.
- [22] 李兆君, 马国瑞. 腐植酸尿素的制造及其增产作用机理的研究近况[J]. 土壤通报, 2004, 35(6): 799 ~ 801.
- [23] 冯元琦. 我国的腐植酸包膜尿素[J]. 腐植酸, 2001(3): 47 ~ 49.
- [24] 程亮, 徐丽, 侯翠红, 等. 低温条件下纳米腐植酸-尿素配合物的制备及表征[J]. 化工学报, 2015, 66(7): 2725 ~ 2736.
- [25] 武丽萍, 成绍鑫. 包裹型长效腐植酸尿素的化学组成结构研究[J]. 燃料化学学报, 2001(5): 454 ~ 457.
- [26] 姜剑平, 孙明强, 郭玉荣, 等. 腐植酸尿素的中试工艺研究与应用[J]. 腐植酸, 2009(1): 42.
- [27] 谭钧, 王丽霞, 白风华, 等. 一种在尿素熔融液介质中制备腐植酸尿素络合物的方法: 中国, 201110126666.8[P]. 2011-05-17.
- [28] 王丹凤, 唐忠厚, 张爱君, 等. 腐植酸尿素研究进展及其在甘薯上的应用前景[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(20): 56 ~ 63.
- [29] 贺笑. 氮肥和腐植酸配施对藜麦生长、产量及氮肥利用率的影响[D]. 山西师范大学硕士学位论文, 2019.





- [ 30 ] 金永旭. 人工腐殖酸尿素肥料的合成及其对土壤氮素转化的影响研究 [D]. 东北农业大学硕士学位论文, 2023.
- [ 31 ] Liu Z, Zhu P, Han W Q, et al. Unraveling the mechanism of straw-derived humic acid in mitigating urea nitrogen volatilization loss in four Chinese soils[J]. Industrial Crops Products, 2025, 223.
- [ 32 ] Kasim S, Ahmed O H, Nik Muhamad A M, et al. Effect of organic based N fertilizer on dry matter (*Zea mays* L.), ammonium and nitrate recovery in an acid soil of Sarawak, Malaysia [J]. American Journal of Applied Sciences, 2009, 6(7): 1289 ~ 1294.
- [ 33 ] Zhao B Q, Li X Y, Liu H, et al. Results from long-term fertilizer experiments in China: the risk of groundwater pollution by nitrate[J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2011, 58(3/4): 177 ~ 183.
- [ 34 ] Dong L, Cordove-Kreylos A L, Yang J, et al. Humic acids buffer the effects of urea on soil ammonia oxidizers and potential nitrification[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(8): 1612 ~ 1621.
- [ 35 ] Canellas L P, Olivares F L, Aguiar N O, et al. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 196: 15 ~ 27.
- [ 36 ] Tavaers O C H, Santos L A, Ferreira L M, et al. Humic acid differentially improves nitrate kinetics under low and high-affinity systems and alters the expression of plasma membrane  $H^+$ -ATPases and nitrate transporters in rice[J]. Annals of Applied Biology, 2017, 170, 89 ~ 103.
- [ 37 ] Chen X G, Kou M, Tang Z H, et al. Responses of root physiological characteristics and yield of sweet potato to humic acid urea fertilizer[J]. Public Library of Science One, 2017, 12(12): e0189715.
- [ 38 ] Annin L, Arkounm, Ourry A, et al. Microarray analysis of humic acid effects on *Brassica napus* growth: involvement of N, C and S metabolisms[J]. Plant Soil, 2012, 359, 297 ~ 319.
- [ 39 ] 郝翔翔, 王翠, 邹文秀, 等. 典型黑土的黑度与土壤有机质组分关系研究 [J]. 土壤学报, 2023, 60 ( 5 ) : 1421 ~ 1429.
- [ 40 ] Fedotov G N, Shoba S A. On the nature of humic substances[J]. Eurasian Soil Science, 2015, 48: 1292 ~ 1299.
- [ 41 ] Petrov D, Tunega D, Gerzabek M H, et al. Molecular dynamics simulations of the standard leonardite humic acid: microscopic analysis of the structure and dynamics[J]. Environmental Science Technology, 2017, 51(10): 5414 ~ 5124.
- [ 42 ] Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability[J]. Geoderma, 1997, 75(3 ~ 4): 267 ~ 277.
- [ 43 ] Fungo B, Lehmann J, Kalbitz K, et al. Aggregate size distribution in a biochar-amended tropical ultisol under conventional hand-hoe tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165: 190 ~ 197.
- [ 44 ] Chen Z, Wang H, Liu X, et al. Changes in soil microbial community composition and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: 105228.
- [ 45 ] 孙克刚, 张梦, 李玉顺. 腐植酸尿素对冬小麦增产效果及氮肥利用率的影响 [J]. 腐植酸, 2016 ( 3 ) : 18 ~ 21.
- [ 46 ] 魏永富, 张胜, 李星星, 等. 不同腐殖酸尿素对玉米氮素吸收及增产效应的研究 [J]. 北方农业学报, 2018, 46 ( 4 ) : 52 ~ 57.
- [ 47 ] 张博文, 赵淼, 田玉华, 等. 腐植酸功能性肥料在水稻上的应用研究 [J]. 腐植酸, 2017 ( 1 ) : 22 ~ 27.
- [ 48 ] 李源, 张炎, 哈丽哈什·依巴提, 等. 腐植酸尿素施用量及不同配比对新疆膜下滴灌棉花产量及氮肥利用的影响 [J]. 西北农业学报, 2019, 28 ( 2 ) : 191 ~ 197.
- [ 49 ] 薄录吉, 李彦, 罗加法, 等. 施肥对黄河三角洲盐碱地作物产量及其构成因素的影响 [J]. 江西农业学报, 2018, 30 ( 5 ) : 44 ~ 48.
- [ 50 ] 陈迪文, 周文灵, 沈大春, 等. 不同类型增效尿素对甘蔗产量和氮素利用率的影响 [J]. 甘蔗糖业, 2017 ( 5 ) : 11 ~ 16.
- [ 51 ] 常会庆, 李兆君. 腐植酸尿素与复合微生物菌剂配施对番茄产量和品质的影响 [J]. 河南农业科学, 2016, 45 ( 4 ) : 113 ~ 116.
- [ 52 ] 林海涛, 江丽华, 刘兆辉, 等. 腐植酸尿素新型生

- 产工艺及田间应用效果研究[J]. 腐植酸, 2010(4): 9 ~ 16.
- [53] Shen Y W, Lin H T, Gao W S, et al. The effects of humic acid urea and polyaspartic acid urea on reducing nitrogen loss compared with urea[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(12): 4425 ~ 4432.
- [54] Kong B S, Wu Q C, Li Y Q, et al. The application of humic acid urea improves nitrogen use efficiency and crop yield by reducing the nitrogen loss compared with urea agriculture[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 1996.
- [55] Liu M, Xu M, Xu J K, et al. Humic acid urea enhanced productivity and reduced active nitrogen loss in summer maize-winter wheat cropping system: a field lysimeter experiment[J]. Field Crops Research, 2024, 319: 109656.
- [56] 李伟, 袁亮, 赵秉强, 等. 增值尿素的氮挥发特征及其对土壤微生物量碳和脲酶活性的影响[J]. 腐植酸, 2013(6): 15 ~ 20.
- [57] 许俊香, 邹国元, 孙钦平, 等. 腐植酸尿素对土壤氮挥发和玉米生长的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 934 ~ 939.
- [58] 吴钦泉, 谷端银, 陈士更, 等. 活化腐植酸肥料氮素土壤淋溶释放效果评价[J]. 磷肥与复肥, 2014, 29(4): 9 ~ 10, 40.
- [59] 潘根兴, 丁元君, 陈硕桐, 等. 从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质[J]. 地球科学进展, 2019, 34(5): 451 ~ 470.
- [60] Oliveira M, Barré P, Trindade H, et al. Different efficiencies of grain legumes in crop rotations to improve soil aggregation and organic carbon in the short-term in a sandy cambisol[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 186: 23 ~ 35.
- [61] 曾宪成, 李双. 腐植酸与气候智慧型农业[J]. 腐植酸, 2018(6): 11 ~ 19.
- [62] 智燕彩. 人工腐殖酸的促生提质与碳减排增汇效应及机制[D]. 江南大学博士学位论文, 2024.
- [63] 汤春宇. 人工腐殖质强化黑土区农田土壤有机碳固持机制研究[D]. 东北农业大学博士学位论文, 2022.
- [64] 刘艳丽, 丁方军, 谷端银, 等. 不同活化处理腐植酸-尿素对褐土小麦-玉米产量及有机碳氮矿化的影响[J]. 土壤, 2015, 47(1): 42 ~ 48.
- [65] 徐佰青, 王雨, 张雷, 等. 腐殖酸的人工合成及其在环境污染修复中的研究进展[J]. 环境工程学报, 2024, 18(7): 1768 ~ 1782.
- [66] Shao Y C, Li Z H, Long Y Y, et al. Direct humification of biowaste with hydrothermal technology: a review[J]. Science of the Total Environment, 2023: 168232.
- [67] Gao P Q, Dou S. Study on molecular structure model and visualization of humic acids in different soils based on statistics[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(3): 2920 ~ 2932.
- [68] Stevenson F J. Humus Chemistry[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.

## 腐植酸与“三甲”肥料

黑色腐植酸乃大地之父；氮磷钾为“三甲”肥料。腐植酸之氮磷钾构效，大小分子兼具，活性功能团多样，组合条件充分，是“没有毛病”的营养材料。腐植酸是测试土壤肥力的“金标准”。现品“三甲”于后。

一品“氮素”肥，亦即腐植酸氮肥。腐植酸之氮素主责有三，一则抑制脲酶缓释；二则减少氮挥发；三则提质增效。腐植酸尿素典范也！氮是生命元素。

二品“磷素”肥，亦即腐植酸磷肥。腐植酸之磷素大法有三，一法活磷为先；二法转难溶为枸溶；三法推助当季利用。腐植酸磷铵垂青也！磷是骨骼元素。

三品“钾素”肥，亦即腐植酸钾肥。腐植酸之钾素三较独活，一较活钾活品；二较阳交阳生；三较促钾吸收。腐植酸钾肥活脱也！当然，还有黄腐酸钾活力更甚！钾是活力元素。

(2019年5月29日曾宪成题)