

认识腐植酸对作物生长和土壤健康的作用

Kwame Ampong¹, Malinda S.Thilakaranthna¹, Linda Yuya Gorim¹ 著

孙梦宇² 肖 凡² 缪春语² 宋亚茹² 孙志梅^{2*} 译

1 加拿大阿尔伯塔大学农业、食品与营养科学系 埃德蒙顿 T6G 2R3

2 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071000

摘 要: 腐植酸 (HA) 是有机分子, 在改善土壤性质、植物农艺性状和生长方面发挥着重要作用。HA 的来源包括煤、褐煤、土壤和有机材料。近年来, 为了保证农业生产的可持续性, 以 HA 为原料的产品已广泛应用于农作物生产中。相关研究表明, HA 对土壤的物理、化学和生物学性质都有积极的影响, 包括土壤质地、结构、持水量、阳离子交换容量 (CEC)、pH、土壤碳氮循环、酶活性和养分有效性等等。本文着重介绍了 HA 对作物生长、激素分泌、养分吸收和同化、产量和蛋白质合成的影响。HA 对土壤性质和作物的影响受 HA 类型、HA 施用量、HA 施用方式、土壤类型、溶解度、分子大小和官能团的影响。本文还指出了 HA 领域亟待研究的一些知识空白。在不同轮作体系、氮肥形态、地点和气候条件下, HA 及其施用量的相关田间试验研究还比较有限。此外, HA 的化学和分子结构、水溶和碱溶组分也缺少田间试验验证以评估其对作物产量、品质和土壤健康的影响。施用 HA 后土壤-植物养分有效性与植物养分吸收之间的关系也有待进一步研究。

关键词: 腐植酸; 腐殖质; 植物生长; 农艺参数; 土壤性质; 养分有效性

中图分类号: S156, TQ314.1 **文章编号:** 1671-9212(2024)01-0018-13

文献标识码: A

DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2024.01.003

Understanding the Role of Humic Acids on Crop Performance and Soil Health

Kwame Ampong¹, Malinda S. Thilakaranthna¹, Linda Yuya Gorim¹ write

Sun Mengyu², Xiao Fan², Miao Chunyu², Song Yaru², Sun Zhimei^{2*} translate

1 Department of Agricultural, Food and Nutritional Science, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada, T6G 2R3

2 College of Resources and Environmental Science, Hebei Agricultural University, Baoding, 071000

Abstract: Humic acids (HA) are organic molecules that play essential roles in improving soil properties, plant growth, and agronomic parameters. The sources of HA include coal, lignite, soils, and organic materials. Humic acid-based products have been used in crop production in recent years to ensure the sustainability of agriculture production. Reviewed literature shows that HA can positively affect soil physical, chemical, and biological characteristics, including texture, structure, water holding capacity, cation exchange capacity, pH, soil carbon, enzymes, nitrogen cycling, and nutrient availability. This review highlights the relevance of HA on crop growth, plant hormone production, nutrient uptake and assimilation, yield, and protein synthesis. The effect of HA on soil properties and crops is influenced by the HA type, HA application rate, HA application mode, soil type, solubility, molecular size, and functional group. This review also identifies some knowledge gaps in HA studies. HA and its application rate have not been tested in field experiments under different crops

[收稿日期] 2023-02-03

[译者简介] 孙梦宇, 女, 硕士研究生, 研究方向为土壤健康与高效施肥, E-mail: 13292258387@163.com。* 通讯联系人: 孙志梅, 女, 教授, E-mail: sunzhm2002@163.com。



in rotation, nitrogen fertilizer forms, sites and climatic conditions. Furthermore, HA chemical and molecular structures, their water and alkaline soluble fractions have not been tested under field experiments to evaluate their effects on crop yield, quality, and soil health. The relationship between soil-plant nutrient availability and plant nutrient uptake following HA application should also be further studied.

Key words: humic acids; humic substances; plant growth; agronomic parameters; soil properties; nutrient availability

腐殖质 (HS) 是动植物残体降解后的残余物, 如木质素、单宁、纤维素和角质 (Tan 等, 2000; Billingham, 2012; Hayes 和 Swift, 2020)。收获后的作物残留物还田后, 土壤中的 HS 大量增加 (Wiesler 等, 2016)。养殖业的发展以及沼气产量的增加, 减少了大部分耕地上的作物残体还田量, 导致土壤中的 HS 含量下降。在过去的几十年里, 研究人员试图通过增施外来的添加物来补充土壤下降的 HS (Rose 等, 2014; Gerke, 2018)。HS 的外部来源大多为来自于土壤、风化煤、褐煤和有机物料的商业化产品 (Gollenbeek 和 VanDerWeide, 2020; Yang 等, 2021)。

根据 HS 组分在水、酸或碱溶液中的溶解度不同, HS 被分为腐植酸 (HA)、黄腐酸 (FA) 和腐黑物三部分 (DeMelo 等, 2016)。由于 HS 中的腐黑物具有难降解性质, HA 和 FA 组分具有能够在短时间内改善土壤肥力和健康的作用一直备受关注。HS 中的 HA 和 FA 组分具有化学活性, 且能抵抗微生物反应, 因此在土壤和植物中发挥着有益作用 (Billingham, 2012)。HA 的长期抗降解能力及其疏水性和亲水性使其容易与阳离子形成复合物 (Wood, 1996)。HA 中含有约 60% 的有机碳 (C), 对土壤微生物的生长起着重要作用 (Sible 等, 2021)。除 C 外, HA 中还含有氮 (N)、氧 (O)、氢 (H) 和硫 (S)。

HA 发挥着以下重要功能, 如: 通过改善土壤结构、质地、持水量 (WHC) 和微生物菌群来改善土壤的物理和生物化学活性 (Nardi 等, 201, 2021; Fuentes 等, 2018; Shah 等, 2018), 通过对养分的螯合作用以及向植物体内的协同运输提高土壤养分有效性, 特别是微量元素 (Yang 等, 2021); 通过形成沉淀作用减少有毒重金属的运

移, 从而减少植物对有毒重金属的吸收 (Wu 等, 2017)。HA 还可以通过发挥植物刺激素 (如生长素和细胞分裂素) 的作用促进作物生长, 这些激素有助于提高作物的抗逆性能、促进营养代谢和光合作用 (Billingham, 2012; Rose 等, 2014; Canellas 等, 2020; Laskosky 等, 2020; Nardi 等, 2021; van Tol de Castro 等, 2021)。但另有一些研究发现, 施用 HA 对作物生长和土壤健康没有明显影响 (Albiach 等, 2001; Bybordi 和 Ebrahimian, 2013; El-Bassiouny 等, 2014; Mukherjee 等, 2014; Kelapa 和 Banyuasin, 2016)。尽管高量 HA 的施用有助于改善土壤的物理特性 (Gollenbeek 和 VanDerWeide, 2020), 但其对土壤化学特性和作物的影响仍不确定 (Rose 等, 2014)。Rose 等 (2014) 在分析了大部分温室试验效果的影响因素时发现, HA 对根和茎生长均有显著影响, 而施用量只显著影响茎的生长。DeMelo 等 (2016) 的一篇综述强调羧基 (COOH) 和酚羟基 (OH) 是 HA 的主要特征, 决定了它们在土壤中的功能。Nardi 等 (2021) 的研究表明, HA 的化学和分子结构、来源和施用量是影响作物和土壤效果的重要因素。更为重要的是, HA 的施用可能会对作物产量产生不一致的结果, 这可能与 HA 的来源不同有关 (Sible 等, 2021)。

鉴于 HA 来源和试验条件的差异, 会导致 HA 施用对作物农艺性状的影响不一致, 而且与实验室试验相比, 关于田间试验的相关报道较少, 本文旨在进一步明确 HA 在农业生产中的应用效果。本文的目的是: (1) 明确 HA 在实验室和田间试验条件下对作物农艺性状和土壤健康参数的影响; (2) 明确影响 HA 效果的因素; (3) 明确 HA 在作物性能和土壤健康方面应用的知识空白。

1 腐植酸结构与功能的关系

HA 的功能与其结构息息相关，而 HA 结构又取决于其来源（Rupiasih, 2005; Garcíá 等, 2016; Garcíá 等, 2019; Nardi 等, 2021; Van Tol de Castro 等, 2021）。尽管 HA 中包含许多官能团，但最主要的是酚羟基（OH）和羧基（COOH）（图 1）（Nardi 等, 2021）。COOH 和 OH 官能团直接影响着 HA 的功能，如改善土壤理化性质和植物生长（图 1）（DeMelo 等, 2016; Nardi 等, 2021）。这些官能团的解离产生极性端和非极性端，分别具备亲水性和疏水性（Mirza 等, 2011）；两端在赋予 HA 功能的机制中发挥着重要作用（图 2A）。亲水端主要起螯合作用，疏水端起排斥作用（Billingham, 2012）。一旦 OH 和 COOH 基团解离，阴离子部分的极性端在土壤中通过静电与金属阳离子形成络合物，从而将这些金属离子保留在土壤中（图 2B）。亲水部分可以通过促进土壤团聚体的形成，改善土壤的 WHC。而非极性端通过对水分子的排斥，减少水的渗透，提高黏土团聚体的稳定性（Billingham, 2012）。Van Tol de Castro 等（2021）的一项研究表明，HA 的芳香族和脂肪族官能团可以通过促进水稻对氮的吸收和可溶性糖

的合成，提高水稻产量（图 1）；Garcíá 等（2016）的研究也发现了 HS 芳香族和脂肪族官能团能够促进水稻幼苗根系生长。

HA 的低分子量组分（LMW）比高分子量组分（HMW）含有更多的酚羟基和羧基官能团（DeMelo 等, 2016）。HA 的螯合能力也主要体现在 LMW 上，可以有效改善土壤的生化特性，而 HMW 则可以有效地改善土壤的物理特性（Yang 和 Antonietti, 2020）。研究发现，HMW 可以刺激质膜 H^+ -ATP 酶，使得 LMW 可以协同运输营养物质到植物体内，并在植物体内发挥其他的生物活性功能（图 1）（Nardi 等, 2021）。蚯蚓粪中 HA 的 HMW 和 LMW 组分应用于拟南芥和玉米幼苗时，均表现出了刺激根系生长的作用（Canellas 等, 2010）。Nardi 等（2021）的一篇综述也指出，HA 的分子量大小会影响植物根际有机酸的释放。HA 的化学和分子组成及功能如图 1 所示。HA 结构与有机酸之间的相互作用还有待进一步研究，特别是在根际，HA 与不同作物的相互作用不同。此外，考虑到已有文献报道的 HA 对根系质膜的刺激作用，HA 分子大小如何影响根系分泌物的释放还需进一步深入研究（Nardi 等, 2021）。

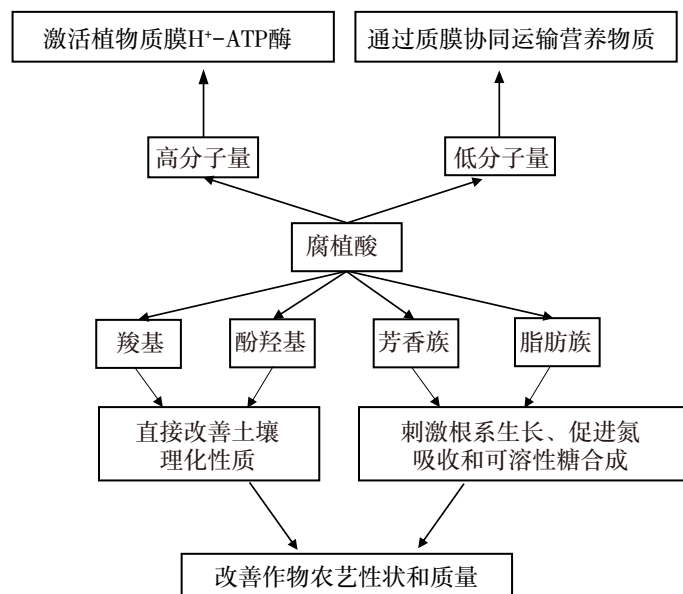


图 1 腐植酸的化学和分子组成及其功能

Fig.1 Graphical representation of humic acid, its chemical and molecular constituents and functions

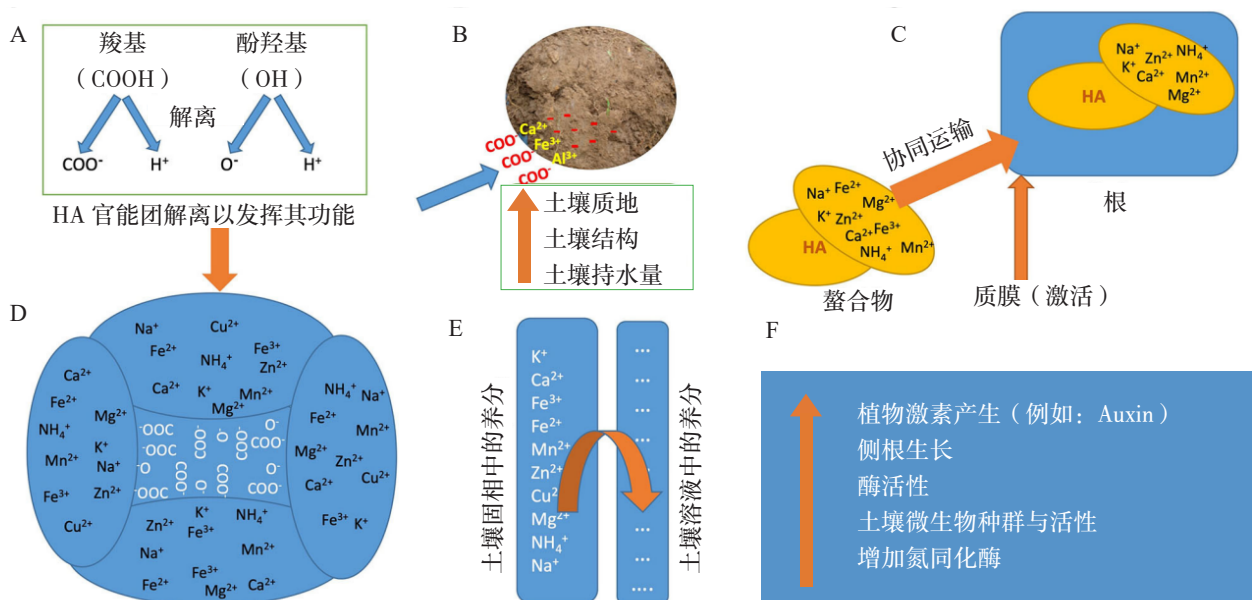


图 2 模型汇总土壤和植物中的 HA 机制和功能

Fig.2 Model summarizing the mechanisms and functions of humic acids (HA) in soils and plants

注：(A) HA 官能团的解离；(B) 解离官能团的亲水端连接金属离子和土壤表面；(C) HA 螯合阳离子营养物质并通过根系质膜进行运输；(D) 解离官能团的亲水端吸引阳离子（提高土壤的 CEC）；(E) HA 补充土壤溶液中的养分（提高土壤的缓冲能力）；(F) HA 的其他功能。

2 腐植酸对土壤和植物的影响

2.1 土壤质地、结构和持水量

连作对土壤质地和结构有负面影响。而施用 HA 对退化土壤会产生积极影响 (Billingham, 2012; Yang 等, 2021)。表 1 总结了 HA 对土壤性质的影响。土壤结构的稳定性归因于 HA 在粘土表面较强的吸附性 (Chen 等, 2017)。HA 可以与土壤中的金属阳离子形成螯合物 (Yamaguchi 等, 2004; Billingham, 2012)。这些金属阳离子为 HA 和粘土矿物表面之间的桥梁 (图 2B)。例如, 在连作 7 年玉米的退化沙质土中施用膨润土-HA 增加了大团聚体的比例 (Zhou 等, 2019)。一项对照研究表明, 施用腐植酸钾增加了酸性和碱性壤土的团聚体稳定性 (Imbufe 等, 2005)。Piccolo 等 (1997) 进行的类似试验中也发现, 在 24 h 控制湿度条件下, 煤源 HA 增加了土壤结构的稳定性, 与土壤类型无关。

当然, 也有应用 HA 后效果不明显的报道。Albiach 等 (2001) 发现, 在沙质粉质沙质壤土上

连续施用商业化生产的 HA 5 年后对土壤团聚体稳定性没有显著影响。同样, 在经过 2 个玉米生长周期后, 施用煤源 HA 也没有明显提高土壤团聚体的稳定性 (Mukherjee 等, 2014)。在上述两个试验中, HA 的施用量不足可能是导致对土壤质地和结构影响不明显的主要原因。此外, 如 Gerke (2018) 的综述指出的, 上述研究中的供试土壤均是中性至碱性土壤, 可能也会对 HA 的分子桥接作用产生负面影响。HA 来源也影响土壤质地和结构 (Rose 等, 2014), 因此, 对研究人员而言, 测试单一 HA 来源的效率是非常重要的, 而不是将结果外推到其他来源的 HA。

HA 也具有增加土壤 WHC 的作用 (Billingham, 2012; Yang 等, 2021)。HA 的亲水部分和对土壤结构的改良增加了土壤 WHC。也有报道称, HA 和 FA 的结合施用有利于形成胶体或腐殖质粘土复合物, 从而增加土壤的 WHC (Billingham, 2012)。在一项为期 7 年的膨润土-HA 对土壤持水量影响的田间试验中, 30 Mg/hm² 的用量显著提高了土壤 WHC, 并且在试验第 4 年后就显示

出了明显的效果（Zhou 等，2019）。施用 HA 可以增加植物中的脯氨酸和甜菜碱，这是植物在水

分胁迫下的一种适应性反应（El-Bassiouny 等，2014）。

表 1 腐植酸对土壤性质的影响
Tab.1 Summary of humic acids on soil properties

HA 来源	土壤质地	对土壤性质的功能	试验类型	试验持续时间	参考文献
膨润土	退化的沙质土	增加了大团聚体的稳定性和 WHC	大田	7 年	Zhou 等，2019
腐植酸钾	壤土	增加了团聚体的稳定性	实验室	24 小时	Imbufe 等，2005
原生氧化的褐煤	粉质粘壤土，粉质壤土和壤土	增加了结构稳定性	实验室	24 小时	Piccolo 等，1997
商业化生产的液体 HA	沙质粉质壤土	对质地和结构没有影响	大田	5 年	Albiach 等，2001
风化煤	粉质粘壤土	对质地和结构没有影响	大田	2 年	Mukherjee 等，2014
泥炭和风化煤	粉质沙土	增加了 CEC	实验室	—	Giannouli 等，2009
腐殖质、泥炭和生物炭	—	增加了 CEC，降低了 pH	实验室	2 个月	Laskosky 等，2020
HA 肥料	—	对 pH 值无影响，增加了土壤酶	大田	3 年	Li 等，2019
堆肥和褐煤	沙质粉土	增加了碳截存	实验室	3 个月	Spaccini 等，2002
商业化生产的	黏土	增加了 OC 和结构稳定性	实验室	2 个月	Gümüş 和 Seker，2015
植物残留物和动物粪便	黏土	增加了碳截存	大田	17 年	Loss 等，2013

注：—代表无有效信息，下同。

2.2 土壤阳离子交换容量

土壤的保肥能力取决于它能吸附的阳离子数量。研究表明，HA 可增加土壤的阳离子交换容量（CEC）（图 2D）（Billingham，2012）。Yang 等（2021）总结了 HA 在提高 CEC 方面的贡献：

（1）通过为无机胶体提供较大的表面积增加对交换性阳离子的吸附量；（2）COOH 和 OH 基团的解离产生极性端，从而与阳离子结合形成复合物；（3）促进土壤矿物质的溶解，从而为化学反应的发生提供更大的表面积。一项利用来源于泥炭和风化煤的 26 种 HA 进行的土壤培养试验研究表明，所有处理的土壤 CEC 均有所提高，提高幅度为 1%~58%（Giannouli 等，2009）。但试

验样品的基础 CEC 与相应改良后的土壤 CEC 的增加比例间无明显线性相关关系。这可能表明，HA 的 CEC 并没有直接转化为改良土壤的 CEC，HA 的质量可能对土壤 CEC 的提高有重要影响。Laskosky 等（2020）进行的大麦盆栽试验中，研究了腐殖质、泥炭和生物炭对典型灰色淋溶土退化土壤 CEC 的影响，结果表明，腐殖质改良土壤的 CEC 高于生物炭改良土壤的 CEC。目前尚无更多研究证明 HA 对非根际土壤和根际土壤 CEC 的影响。大部分关于 HA 对 CEC 影响的试验都是在受控环境下进行的短期研究。因此，需要进行几种作物的长期田间试验来进一步探究 HA 对土壤 CEC 的影响，以填补此方面的研究空白。



2.3 土壤 pH

土壤 pH 影响养分有效性。HA 影响土壤 pH 变化的能力取决于它们所含羧基和酚羟基官能团的数量 (Rupiasih, 2005)。很少有研究报道施用 HA 后, 收获后土壤 pH 的变化, 且 HA 对土壤 pH 影响的研究结果也不一致。不同 HA 施用量 (0~26.2 g/kg) 的大麦盆栽试验结果表明, 随着 HA 用量的增加, 收获后土壤 pH 呈下降趋势 (Laskosky 等, 2020)。但连续 3 年的花生田间试验结果却表明, 施用 HA 对土壤 pH 没有显著影响 (Li 等, 2019)。采用小麦水培试验方法研究 HA 对土壤 pH 缓冲能力的影响, 结果表明, 在初始 pH 为 5.3 的情况下, 施用 HA 未能提高营养液的 pH 缓冲能力 (Mackowiak 等, 2001), 作者分析认为是由于试验中应用的 HA 浓度过低导致的。Pertusatti 和 Prado (2007) 的室内试验研究表明, 在 pH 5.5 到 8 的范围内 HA 具有缓冲 pH 变化的能力。总的来说, HA 对 pH 的影响取决于试验条件、植物生长状况和 HA 来源。因此, 今后还需进行进一步研究以探明各种来源的 HA 对土壤 pH 变化影响程度的具体作用条件。

2.4 土壤碳和酶活性

土壤碳含量可直接指示土壤的健康状况。碳排放导致的气候变化及其对环境的不利影响促使研究者开展了对土壤碳固存的研究。HS 是短期和长期活性碳的重要碳库 (Rupiasih, 2005)。HA 和 FA 组分在自然界中都是可分解的, 但分解的速度很慢, 因此, 成了土壤碳的持续供应源。Sible 等 (2021) 指出: 与 FA 相比, HA 含有更多的碳, 这说明 HA 的施用可为土壤微生物额外提供更多的维持活性所必需的碳源。施用 HA 后对土壤中碳的供应取决于 HA 分解速率、周转率和在土壤中的存留时间 (Fontaine 等, 2007)。HA 施入土壤后会进一步转变为小分子组分 (Grinhut 等, 2007), 而周转率取决于植物和微生物协同影响的初始效应 (Dungait 等, 2012)。除了植物和微生物之间的相互作用外, pH、水分、氧气和 HS 性质等环境因素也会影响 HA 的分解速率 (Dungait 等, 2012)。

当前关于 HA 对土壤碳储量的影响已有大量

研究。在一项为期 3 个月的使用 ^{13}C 标记技术研究 HA 添加对碳固存影响的土壤培养试验中, 发现高达 58% 的添加碳被固持 (Spaccini 等, 2002)。土壤含碳量的增加与 HA 的化学性质有关; HA 材料的疏水性越强, 固碳量增加就越多。Gümüs 和 Seker (2015) 通过培养试验发现, 施用 HA 增加了黏土中有机碳的含量, 改善程度取决于其施用量。在另一项关于巴西黏土上的臂形草 / 牲畜和珍珠粟 / 无牲畜系统的研究中, 发现 HA 含量较高的系统具有较高的碳固存量 (Loss 等, 2013)。在室内种植豌豆 60 天后, 与单施化肥及不施化肥和蚯蚓粪的处理相比, 使用富含 HA 的蚯蚓粪通过提高微生物量碳和微生物种群数量, 显著增加了砂壤土中的碳固存量 (Maji 等, 2017)。当前 HA 对总碳库影响的研究较多, 但没有对易分解碳和难降解碳影响的报道。我们目前只发现了一项研究, 探讨了在田间条件下, 有机废弃物中的 HA 对富含 HS 土壤中易分解碳和难降解碳的影响 (Hu 等, 2019), 结果发现, 高 HA 用量与土壤中易分解碳呈负相关, 而与土壤中难降解碳呈显著正相关。HA 对轮作系统作物及后茬土壤碳库组分的长期田间定位研究还鲜有报道, 需进一步加强研究 (Olk 等, 2018)。

HA 的施用可以增加微生物群落的数量和活性 (Maji 等, 2017; Li 等, 2019)。一项为期 3 年的豌豆连作试验研究了 HA 对土壤中酶活性的影响, 结果发现, 在温室条件下, 植物生长 140 天后, 施用 1000 kg/hm² 的 HA 显著提高了土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性 (Li 等, 2019)。同样, 在豌豆盆栽试验中, 施用 9000 kg/hm² 富含 HA 的蚯蚓粪, 植物生长 12 天后脲酶活性也显著提高 (Maji 等, 2017)。两项研究中, 施用 HA 后微生物数量、C/N 比增加是可能导致脲酶活性增加的原因所在。但 Shen 等 (2020b) 在土壤培养试验中发现, 施用风化煤中提取的 HA 会抑制脲酶活性。同样, 也有研究证明风化煤提取的 HA 也抑制了脲酶的活性 (AL-Kanani 等, 1990)。AL-Kanani 等 (1990) 和 Shen 等 (2020b) 在研究中没有关注微生物量, 但非根际土壤中生物活性的降低可能降低了微生物量, 并抑制了脲酶活性 (Elmajdoub 等, 2014)。

HA 中与酚羟基和羧基官能团结合的酶以及高分子量可能也会抑制脲酶活性 (Tomar 和 MacKenzie, 1984)。HA 对不同土壤类型不同作物体系土壤酶活性的影响仍需要进一步研究。

2.5 尿素的水解、氨化和硝化作用

尿素因其具有突出的成本优势成为农业生产中最常使用的氮肥。尿素在被植物吸收之前, 必须首先水解成铵, 然后通过硝化和反硝化作用将铵分别转化为硝酸盐和氮气 (Shen 等, 2020)。硝酸盐由于其疏水性容易在土壤中淋失, 但铵在土壤中是稳定的 (Oelmann 等, 2007)。植物可以以铵态氮和硝态氮的形式吸收氮素 (Ups 等, 1990)。但由于硝态氮会影响氮的利用效率 (NUE), 铵向硝酸盐的快速转化一直是农学家关注的焦点 (AL-Kanani 等, 1990; 巴斯等, 2020)。尿素的水解是由土壤中微生物产生的脲酶催化的 (Tomar 和 MacKenzie, 1984)。尿素水解的速率也与高浓度的镍有关 (Tan 等, 2000)。由于 HA 的螯合特性, 它能够形成镍络合物, 从而减缓尿素水解 (Sible 等, 2021)。

然而, 有不少研究报道了 HA 对尿素水解影响的相互矛盾的结果 (AL-Kanani 等, 1990; Maji 等, 2017; Li 等, 2019)。一项为期 90 天的土壤培养试验研究了从煤炭中提取的 HA 对尿素转化的影响, 结果表明, 与对照相比, 施用 HA 使尿素水解减少了两倍 (Shen 等, 2020), 土壤铵态氮浓度在第 3 天之前保持稳定, 之后急剧下降; 土壤铵态氮浓度的降低反映了相应的土壤硝态氮浓度的增加。AL-Kanani 等 (1990) 进行的一项类似研究发现, 从风化煤中提取的最高 3.4% 的 HA 的施用导致了两种典型土壤中尿素的水解增加了 5%~22%。在上述所有试验中, 施用 HA 后土壤的 pH 值都有所下降。也有研究表明, 施用 HA 可减少土壤硝化微生物, 从而增加铵态氮浓度, 降低土壤硝化速率 (Dong 等, 2009)。在一个种植大麦的盆栽试验中研究生物炭、泥炭和腐殖质对根际尿素水解和硝化的影响, 结果发现含有较高 HA 的腐殖质促进了尿素水解为铵的过程, 同时降低了铵转化为硝酸盐的硝化作用 (Laskosky 等, 2020)。腐殖质处理

中高的铵态氮含量进一步导致了 CEC 的增加和 pH 的降低。值得注意的是, 不同研究中使用的 HA 化学和结构组成不同, 施用量也不同。因此, 在确定的生长条件下, 研究 HA 来源和施用量对不同作物体系尿素水解及其后续硝化反硝化作用的影响是很有意义的。

2.6 土壤养分有效性与植物吸收

如图 2A-F 所示, HA 能够增加土壤养分有效性和植物吸收养分的能力。许多研究表明 HA 能够稳定铵, 从而提高土壤氮的有效性 (Ahmed 等, 2006; Dong 等, 2009; Rose 等, 2014; Zhang 等, 2019; Laskosky 等, 2020; Shen 等, 2020)。HA 中也含有氮, 施入土壤也成为植物的有效氮源 (Billingham, 2012)。植物主要以铵态氮和硝态氮的形式吸收氮素, 但也可以吸收氨基酸态氮 (Nardi 等, 2002)。高等植物对 HA 和氮的吸收取决于它们的分子大小和羧基官能团 (Nardi 等, 2000)。Piccolo 等 (1992) 研究表明, 植物对氮的吸收与低分子量 (LMW) HA 和 HA 的羧基官能团的数量呈正相关。Tavares 等 (2019) 研究了来源于蚯蚓粪的 HA (80 mg/L) 对水稻植株暴露于铵和硝酸盐 48 h 后氮吸收的影响, 发现蚯蚓粪显著促进了水稻对铵和硝态氮的吸收。

除氮外, 磷也是植物的必要营养元素, 能协同促进作物生长。HA 和 FA 的施用已被证明可以提高土壤微生物分泌的磷酸酶活性, 从而提高土壤中磷的有效性 (Sharma 等, 2013)。HA 还会减少土壤对磷的吸附, 促进磷的解吸, 从而提高土壤溶液中的磷含量 (Zhu 等, 2018)。HA 也可以螯合土壤微量元素并将其协同运输到植物根系附近 (图 2C) (Sible 等, 2021)。然而, HA 这种协同运输养分的能力取决于 HA 的分子量 (Zanin 等, 2019)。HA 还可以增加质膜的通透性, 从而促进植物对养分的吸收 (图 2C) (Nardi 等, 2002)。HA 施用量越高, 土壤的 CEC 就越高 (Laskosky 等, 2020)。虽然高浓度的 HA 可以改善土壤的物理性质, 但它的高结合能力也会使植物无法吸收某些营养物质, 特别是微量元素。HA 羧基和酚羟基作为金属螯合剂, 在土壤中形成金属-HA 螯合物, 这



可能增加了土壤中微量元素的含量,但却降低了其植物有效性(Yang 等, 2021)。例如,Shen 等(2020)认为,高浓度的 HA 可以有效固定土壤中的铁、锌和锰等重金属,从而限制植物对这些重金属的吸收。Nandakumar 等(2004)的研究也表明,在稻田中施用腐植酸钾(最高 20 kg/hm²)增加了土壤中的微量元素含量,但这些微量元素却无法被植物吸收。另一项研究也表明,10 mL/L 从风化煤中提取的 HA 加 30 mL 霍格兰溶液,并没有显著促进蚕豆对微量元素和钙的吸收(Bulut 和 Akinci, 2010)。由于不同来源的 HA 化学组成和物理性质不同,HA 对土壤微量元素的有效性和植物对养分吸收的关系不能被认为就是正线性相关关系。因此,需要进行研究以阐明 HA 用量、养分有效性和植物吸收之间的关系。

2.7 植物氮同化与蛋白质含量

氮是影响植物生长、产量和品质的重要营养元素。植物吸收氮的能力是植物氮同化过程的第一个关键步骤。植物对氮的代谢依赖于可以将植物吸收的氮还原为最终的同化产物的相关酶活性。一项为期 2 周的水培试验结果表明,不同浓度 HA(0, 1, 5 mg/L)的施用显著提高了玉米中参与氮还原和同化过程的酶活性,与 HA 用量有关(Vaccaro 等, 2015)。但这种受 HA 用量影响的酶活反应并没有反映在玉米叶片的蛋白质含量变化上,较低水平的 HA 处理蛋白质含量却显著的高。编码这些酶的基因是由硝酸盐供应介导的(Vaccaro 等, 2015)。Haghighi 等(2012)进行的一项为期 8 周的生菜盆栽试验表明,施用高达 1000 mg/L 的 HA 会因其高浓度而提高硝酸盐浓度和硝酸还原酶活性。与 Vaccaro 等(2015)的研究不同,Haghighi 等(2012)的研究发现,蛋白质含量的增加与 HA 使用量呈正相关。但也有 HA 对籽粒蛋白质含量的影响不一致的报道。Saruhan 等(2011)进行的田间试验结果表明,与对照相比,在不施用基肥的情况下,施用高达 400 g 的液体 HA 显著提高了谷子蛋白质含量;在施肥方式比较中,土壤施肥和叶面施肥的蛋白质含量高于种子处理。然而 Shen 等(2020)的田间试验却发现,叶面施用高达 400 mg/L 的 HA

对谷子蛋白质含量没有显著影响。伊朗的一项为期 2 年的田间试验评估了叶面施用 HA 和不同水平尿素的效果,结果发现这些处理并没有显著增加小麦蛋白质和面筋含量(Nasiroleslami 等, 2021)。与仅施用尿素相比,HA 施用量为 1000 kg/hm²时,第一季花生的蛋白质含量显著提高,但在后 2 年的田间试验中对蛋白质含量影响不显著(Li 等, 2019)。有研究表明,无论施氮量和施氮形式如何,HA 对作物氮素吸收均有积极的促进作用,但同化过程取决于氮形态。另有研究也表明,HA 对蛋白质含量的影响取决于 HA 施用量、施用方式和作物类型。当前对氮同化以及作物蛋白质含量影响方面还缺乏明确答案,可能是 HA 类型对参与代谢过程的酶的影响不同造成的。但为了得到一个明确的作用过程,还需要开展更多的研究。

2.8 植物农艺性状

HA 对植物农艺性状的影响如表 2 所示。已有很多研究探讨了 HA 对植物根和茎的生长、叶绿素含量等农艺性状以及产量的影响,证明施用 HA 不仅可以通过刺激植物分泌激素(如生长素和细胞分裂素)和代谢酶来促进根、茎生长(Rose 等, 2014; Olaetxea 等, 2020),还能通过促进植物对大量和微量元素的吸收,增加叶片叶绿素含量,刺激幼苗生长(Chen 等, 2004; Fan 等, 2014; Sible 等, 2021)。施用 HA 后,通过促进植物根、茎重的增加、提高叶绿素含量和光合速率以及刺激植物激素和酶的分泌等提高作物产量(Delfine 等, 2005; Bybordi 和 Ebrahimian, 2013)。Atiyeh 等(2002)发现,富含 HA 的蚯蚓粪施用量在 0.15~0.4 g/kg 之间时,能够显著提高黄瓜幼苗的株高和叶面积,而较高的 HA 浓度反而不能增加根、茎干重。此外,与只施用 NPK 的处理相比,施用富含 HA 的蚯蚓粪显著增加了豌豆根、茎的长度、高度和重量(Maji 等, 2017)。施用高达 40 mL/L 的 HA 对辣椒叶绿素 a 的浓度没有显著影响,但会增加叶绿素 b 的浓度、果实重量和产量(Karakurt 等, 2009),施用风化煤衍生的 HA 分别增加了温室栽培的非洲菊和油菜的根茎生物量(Akinremi 等, 2000; Nikbakht 等, 2008)。施用来源于有机废弃物的 HA 也显著改善



了菊花的叶绿素含量、叶面积、根和茎干重等农艺性状 (Fan 等, 2014)。Arjumend 等 (2015) 也证明, 不同 HA 水平和推荐的化肥用量对小麦根茎重、叶绿素含量、千粒重和产量均有显著影响。

表 2 腐植酸对作物农艺参数影响的总结
Tab.2 Summary of humic acids effects on crop agronomic parameters

HA 来源	N 源	土壤质地	作物类型	对作物农艺参数的功能	试验类型	试验持续时间	参考文献
蚯蚓粪	铵态氮、硝态氮、尿素	无土栽培、沙壤土	黄瓜、甜菜、番茄	增加了根和茎重、株高及叶面积	实验室	4 个月	Atiyeh 等, 2002; Maji 等, 2017
商业的	有机肥	粉质粘土	胡椒	增加了叶绿素 b, 果实重量和产量	实验室	2 年	Karakurt 等, 2009
风化煤	铵态氮、硝态氮	沙壤土	油菜、青豆、小麦、非洲菊	增加了非洲菊根生物量和油菜茎秆生物量, 但对小麦和豆类无影响	实验室	1 年	Akinremi 等, 2000; Nikbakht 等, 2008
有机废物	—	—	菊花	增加了叶绿素含量, 叶面积, 根和茎重	实验室	2 个月	Fan 等, 2014
褐煤	尿素	粉质壤土	小麦	增加了根和茎重、叶绿素含量和产量	实验室	2 年	Arjumend 等, 2015
—	—	黏土	小麦	增加了株高、穗长、千粒重和产量	大田	2 年	Khan 等, 2010
商业的	铵态氮、硝态氮	沙土	小麦	增加了根和茎重和叶绿素含量, 但对株高、产量和蛋白质无影响	大田	2 年	El-Bassiouny 等, 2014
商业的	铵态氮、硝态氮	壤土	甜叶菊	增加了茎秆生物量	大田	2 年	Mohammed 等, 2019
商业的	尿素	壤土	小麦	增加了穗数、产量但不增加蛋白质含量	大田	2 年	Nasiroleslami 等, 2021
沸石	尿素	壤土	油菜	增加了千粒重、产量和蛋白质含量	大田	2 年	Bybordi 和 Ebrahimian, 2013
—	—	—	谷子	除产量外无影响	大田	2 年	Shen 等, 2020

Khan 等 (2010) 通过田间试验结果发现, 化肥配施 HA 可显著提高小麦株高、穗长、千粒重和总产量, 且在较高的 HA 用量和中等氮磷钾用量下显著提高。El-Bassiouny 等 (2014) 和 Mohammed 等 (2019) 的试验结果也表明, HA 配施化肥显著提高了小麦和甜菊茎干重和叶绿素含量, 而对小麦株高、穗长和产量无显著影响。在伊朗进行的一项为期 2 年的田间试验中, 评估了叶面施用 HA 与不



同氮水平配施的效果,与施用 225 kg/hm² 的尿素相比,在施用量为 150 kg/hm² 时,HA 处理显著提高了小麦的穗数、生物量和产量(Nasiroleslami 等,2021)。在伊朗进行的另一项为期 2 年的油菜田间试验结果表明,不同用量的尿素与富含 HA 的沸石配合施用对油菜的农艺性状没有影响,但尿素和沸石单独使用的油菜农艺性状却显著改善(Bybordi 和 Ebrahimian,2013)。

在上述研究中观察到的不同结果表明,推荐使用 HA 来改善作物的农艺性状只有在特定的试验条件下进行才是可靠的。HA 和矿物肥料的配合施用会形成复合物,起到缓慢释放养分的作用,但相互作用效应主要取决于 HA 来源、施用量和作物类型(Rose 等,2014)。因此,在确定的生长条件下,阐明特定的 HA 来源、最佳施用量和氮肥用量是十分必要的。

3 影响腐植酸效率的因素

3.1 HA 来源

HA 对土壤和作物的影响取决于其来源(Rose 等,2014; Gollenbeek 和 Van Der Weide,2020)。而 HA 的功效则取决于其营养成分、生产方式、官能团组成和预期用途。对 5 种来源不同的 HA 对作物农艺性状的影响进行分析发现,影响效果表现为泥炭>褐煤>土壤>绿色废弃物堆肥>粪便堆肥(Rose 等,2014)。不同有机材料提取的 HA 具有不同的生物活性(Martinez-balmori 等,2014),而且商业化生产的 HA 不如从废弃物中提取的 HA 更有效(Arancon 等,2006),来源于堆肥材料的 HA 能有效改善植物的农艺性状,提高其生理活性(Jindo 等,2020)。然而,Khan 等(2018)却发现,来源于植物和煤炭的 HA 对小麦产量的影响没有显著差异。不同来源的 HA 营养成分和化学结构不同,这可能影响它们在土壤中的施用效果。García 等(2019)发现来源于 Elliot 土壤、泥炭、风化煤、Su Wanee 河和 Hill 土壤中的 HA 官能团数量明显不同。Hamad 和 Tantawy(2018)提取了 3 种不同来源的 HA 进行盆栽试验,结果发现,高

粱根系和茎秆的生长与各种来源 HA 中存在的芳香族、脂肪族和羧基官能团的数量相关,而且氮的吸收与 HA 的羧基官能团数量呈正相关(Piccolo 等,1992; Nardi 等,2000)。然而,当对几种来源的 HA(褐煤、土壤、堆肥、风化煤和泥炭)对真菌的影响进行测试时,发现其效果与 HA 具有的高芳香官能团呈负相关(Wei 等,2018)。这表明 HA 来源的选择应该有针对性。Laskosky 等(2020)用 3 种不同来源、具有不同化学特性的 HA 进行盆栽试验,结果发现,与生物炭相比,N 和 P 初始浓度较高的腐殖质和泥炭来源的 HA 处理大麦植株的 N 和 P 浓度也显著高。当前在实验室和田间条件下评价和比较不同来源 HA 对作物农艺性状影响的研究还非常有限,值得进一步探讨。

3.2 HA 施用量

有人认为,在存在环境胁迫的条件下,HA 的施用效果是最好的(Rose 等,2014)。HA 施用量的有效性也取决于其来源和作物类型(Olk 等,2018)。在缺水条件下,植物会对水分亏缺做出反应,如导致脯氨酸产生。在缺水条件下,不同 HA 施用量对谷子产量有显著影响,但增产效应不依赖于 HA 用量(Shen 等,2020)。同样,HA 可以提高水分胁迫条件下玉米幼苗的过氧化氢酶活性和脯氨酸含量,但促进效果没有表现出与施用量很好的相关性(Canellas 等,2020)。然而,Lotfi 等(2015)的一项早期研究报告称,在缺水条件下,油菜籽中的脯氨酸和过氧化氢酶活性随 HA 用量的增加而增加。在盐胁迫条件下,HA 改善了豆类植物的农艺性状(如株高、叶面积、茎粗、叶绿素含量和产量)和脯氨酸含量(Taha 和 Osman,2018)。Yousif 等(2020)发现,在类似的盐胁迫条件下,玉米农艺性状和脯氨酸含量的增加与 HA 的施用量增加相关。Mohammed 等(2019)在一项田间试验中发现,在最佳土壤水盐(Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺)条件下,甜叶菊的生长和农艺性状都得到了改善,且改善程度与 HA 施用量的增加有关。而 Bybordi 和 Ebrahimian(2013)却未发现不同 HA 施用量对油菜农艺性状的显著影响。营养丰富的 HA 的施用对土壤和植物均会产生影响,可能是因为来自



HA 的营养物质补充到土壤中的结果 (Sible 等, 2021)。Karakurt 等 (2009) 发现适量施用 HA 后辣椒产量增加, 但未施用 HA 的对照处理和较高的

HA 施用量处理产量相似。HA 的施用量取决于环境和土壤条件 (表 3)、来源、成分以及作物类型, 因此很难预测其对不同作物的影响。

表 3 影响腐植酸 (HA) 功效的因素和条件
Tab.3 Factors and conditions that affect humic acids (HA) efficacy

因素	条件	参考文献
HA 来源	从土壤、泥炭、风化煤、褐煤、有机残留物中提取的材料类型、营养成分、化学结构和分子量	Rose 等, 2014; Hamad 和 Tantawy, 2018; García 等, 2019; Laskosky 等, 2020
施用量	胁迫条件 (盐碱、干旱、酸性、重金属浓度)、HA 的营养成分、HA 的来源、作物类型、土壤类型和环境条件	Bybordi 和 Ebrahimian, 2013; Rose 等, 2014; Lotfi 等, 2015; Olk 等, 2018; Mohammed 等, 2019; Baía 等, 2020; Shen 等, 2020; Yousif 等, 2020; Sible 等, 2021
土壤类型	粘土、砂粒的种类和 HA 的吸附能力	Feng 等, 2005; Zhang 等, 2013; Chen 等, 2017; Singh 等, 2017; Nardi 等, 2021; Sarlaki 等, 2021
溶解度	HA 水、碱和酸提取组分	Pinton 等, 1999; Schmidt 和 Santi., 2007; Liu 等, 2008; De Melo 等, 2016; Savy 等, 2017; Sible 等, 2021

3.3 土壤类型

土壤类型是影响 HA 吸附和分解的重要因素。HA 在淋溶作用较弱的土壤中存留时间长, 更容易发挥作用 (Chen 等, 2017)。沙质土壤质地粗, 结构性差, 因此施用的养分和其他土壤改良剂不宜保留在土壤中 (Sarlaki 等, 2021)。有利于 HA 保留在土壤中的粘粒含量在不同土壤类型之间差异很大 (Singh 等, 2017)。不同黏土矿物影响着土壤表面对 HA 的吸附。高岭土为 1 : 1 型黏土矿物, 易与 HA 发生相互作用, 使其附着在黏土矿物表面。Feng 等 (2005) 和 Chen 等 (2017) 发现, 高岭土与蒙脱石的物理和化学特性不同, 与蒙脱石相比, HA 在高岭土表面的吸附量更多。Zhang 等 (2013) 的另一项研究评估了 HA 对 3 种粘土矿物 (高岭土、蒙脱石和伊利石) 的影响, 他们发现, 在 HA 的作用下, 蒙脱石的比表面积减小, 因此与其他粘土矿物相比, CEC 也相对降低, 而蒙脱石中的氢键作用增强, 从而也增加了对 NH_4^+ 的吸附能力。

HA 的施用效果取决于黏土矿物表面的吸附能力, 因此, 不同地区黏土组分的差异对 HA 的功能以及土壤性质、作物性能产生很大影响。例如,

Tahir 等 (2011) 发现, 相对于钙质土壤, 施用 HA 改善了非钙质土壤地区的小麦农艺性状。Khan 等 (2018) 发现, 与砂壤土相比, 黏壤土上的小麦穗重和籽粒产量更高。Nardi 等 (2021) 的研究表明, 施用 HA 后, 不同土壤中的玉米对硝态氮和铵态氮吸收以及氮代谢的影响不同。虽然 Rose 等 (2014) 认为土壤类型对 HA 性能的影响很小, 但他们的样本量过小, 不具有代表性。土壤类型对 HA 功效影响的文献总结如表 3 所示。

3.4 HA 溶解度

HA 的溶解度取决于介质的 pH 值 (MacCarthy 等, 1990)。其在水和碱性介质中都能部分溶解, 但在极低 pH 下沉淀 (De Melo 等, 2016)。有研究表明, 用碱提取 HA 会改变其结构, 因此碱溶提取的 HA 用于研究是不合适的 (Kleber 和 Johnson, 2010), 但 Olk 等 (2019, 以及其中的参考文献) 的观点正好相反。HA 可与土壤阳离子相互作用形成复合物, 这些复合物的溶解度影响了阳离子的释放和植物有效性 (Sible 等, 2021)。因此, HA 在水、酸、碱中的溶解度会影响其对植物的作用效果。Pinton 等 (1999) 发现水溶性 HA 通过激活根细胞质膜上的 H^+ -ATP 酶来



促进植物对硝酸盐的吸收。用硝酸盐和水提取的 HA 处理玉米根系, 通过促进对硝酸盐的吸收使硝酸盐同化酶上调 (Zanin 等, 2018)。Savy 等 (2017) 发现, 因酚羟基官能团的存在, 从芦竹中提取的水溶性 HA 提高了水芹幼苗中的赤霉素活性。施用水溶性 HA 可通过增加根毛、皮层细胞和内胚层切向壁来增加拟南芥的根表面积 (Schmidt 和 Santi, 2007)。

此外, 酸溶 HA 可与土壤中的阳离子形成稳定的络合物 (Liu 等, 2008; De Melo 等, 2016), 从而增加土壤养分有效性, 改善土壤理化特性 (Billingham, 2012)。当前, 关于酸溶 HA 组分的效应, 实验室研究还非常有限, 碱溶和水溶 HA 组分对农作物生长和农艺性状的影响, 田间试验研究也比较有限。因此, 今后应加强对该领域的研究, 以填补这方面的知识空缺。

4 腐植酸研究进展

4.1 提取方法

高效的 HA 提取方法仍然是许多科学家面临的挑战。由于来源于泥炭、土壤和湖泊的 HA 数量少, 较大规模的田间应用受到了一定限制 (Yang 和 Antonietti, 2020)。而由于褐煤和风化煤的储量更丰富, 特别是在产油区, 因此大多数商品 HA 都来源于褐煤和风化煤。这些来源的 HA 往往含碳量较高, 但氧、氮以及羧基和酚羟基官能团含量较低, 而这些官能团正是有助于 HA 的物理、化学和生物活性的 (Fatima 等, 2021)。近年来对如何获得更高产率, 且具有更多的促进植物生长的活性官能团 (羧基和酚羟基) 的 HA 高效提取方法关注较多。用酸对褐煤和风化煤进行预处理, 将复合的化合物分解, 从而将它们还原为较弱的酸性官能团 (Barhoumi 等, 2019)。在碱法提取褐煤和烟煤后, 进一步使用硝酸 (HNO_3) 来提高 HA 的产率 (Zara 等, 2017; Boral 等, 2021; Fatima 等, 2021)。除了 HA 产率增加外, 氮、氧含量及羧基、酚羟基和胺基等官能团的含量也均有所增加。Sabar 等 (2020) 还使用了 HNO_3 、 H_2O_2 和微生物技术 (真菌)

来提高煤源 HA 的产率、分子量和芳香官能团数量。当前对 HA 高效提取方法的研究仍主要集中在如何提高有助于 HA 生物有效性的官能团数量方面。

4.2 HA 的分子机制

过去几十年来, HA 因其在农业生产中对植物生长、农艺参数、抗逆性和土壤健康方面的显著影响而被人们所熟知。直到最近, 当研究人员开始阐明植物如何在分子水平上对 HA 作出响应时, 才知道这些积极影响背后的分子机制。Shah 等 (2018) 在综述中详细介绍了 HA 促进植物生长和适应胁迫条件的分子响应机制。在本文中, 我们重点介绍了植物对 HA 的分子响应机制最新进展。Cha 等 (2020) 表明, 用 HA 处理拟南芥后, 其耐热基因和热激蛋白 (HSP) 上调, 而当 HSP 被敲除后, 拟南芥则无法在高温逆境下生存。Zandonadi 等 (2019) 在 HA 中发现了一种植物生长素, 可以诱导产生玉米细胞分裂素的蛋白基因的过度表达。HA 的施用导致小麦干旱易感基因 GRF 下调, 表明在干旱条件下, HA 可以作为信号分子刺激小麦生长 (Arslan 等, 2020)。用 HA 处理玉米根系, 分别上调了参与抗氧化功能和氮同化途径的 *VHS/GAT* 和 *2-cys* 过氧化物酶 *BASI* 基因 (Nunes 等, 2019)。识别和了解由 HA 引起的这些分子响应, 将有助于植物育种者强化对 HA 能做出响应的相关基因的精准定位。

4.3 知识空白及未来研究需求

在全球背景下, 为减少粮食生产系统中氮肥的施用量, 需要在不同作物、不同土壤类型和不可预测的气候条件下, 优化氮肥施用技术。而 HS 是进一步优化作物施肥和提高氮素利用效率的有效手段。我们已经明确了一些有待于进一步探讨的知识空白 (图 3)。对适用于不同作物的特定的 HA 来源及其施用量和施用方式还有待加强研究。HA、N 形态、地点和气候条件对作物产量、品质以及土壤健康和质量的相互作用也缺乏充分认识, 不同试验条件下 HA-土壤-植物养分有效性与植物养分吸收之间的相互关系研究也存在空白。加强对这方面的认识将有助于农学家和作物生产者了解 HA 与不同作物之间的相互作用方式, 为可持续种植

系统的发展提供理论基础。本文明确了水溶和碱溶 HA 组分以及化学和分子结构对作物产量 / 品质和土壤健康的影响还缺乏盆栽和田间条件下的评价。此外，关于 HA 化学和分子结构（羧基、酚羟基、脂肪族、芳香官能团、HMW 和 LMW 化合物）如何影响作物产量和品质、土壤质量、土壤养分有效性、植物吸收和根系分泌物的信息也较为缺乏。这些问题的研究将有助于 HA 生产行业更加关注给作

物带来显著效益的 HA 组分和官能团。HA 对蛋白质含量影响的实验室和田间试验研究大多数都是通过分析籽粒蛋白质含量进行的，但数据仍然有限，无法得出可靠的结论。此外，大多数谷物和豆类作物都需要获得较高的蛋白质含量，但 HA 在促进氮同化和蛋白质合成方面的机制研究还比较有限。认识 HA 如何提高作物蛋白质含量对 HA 行业的研究者和作物生产者都是至关重要的。

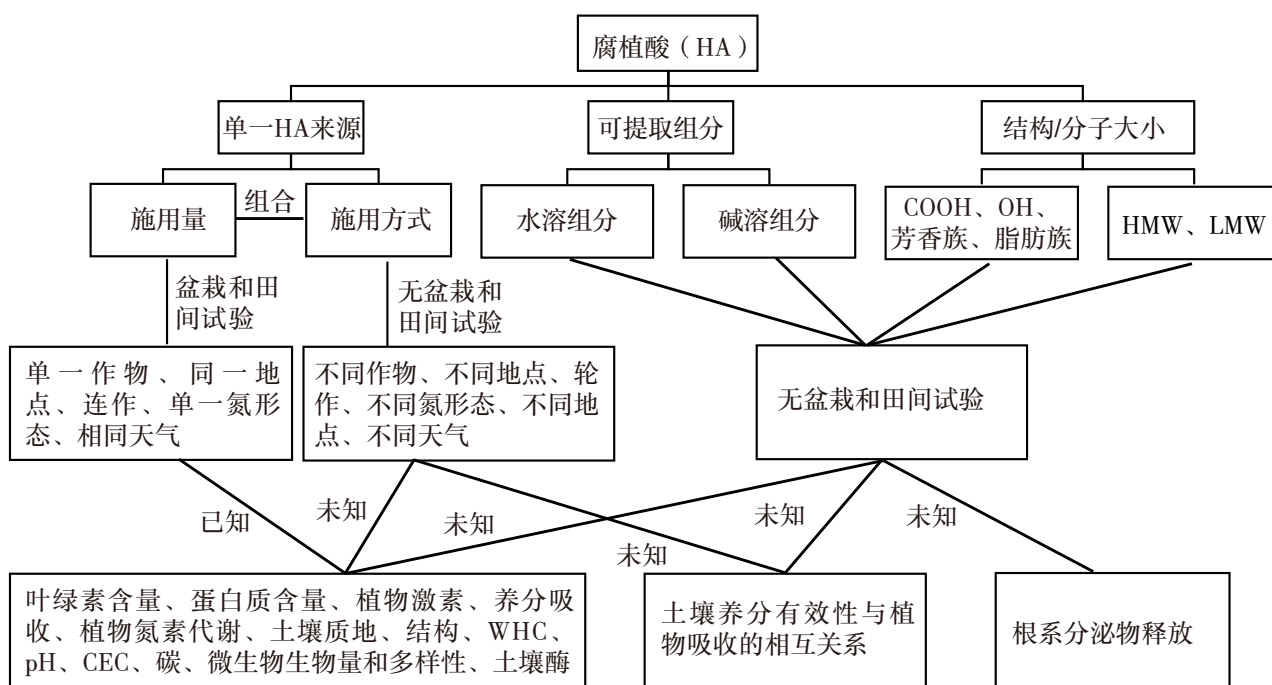


图 3 模型显示了采用盆栽和田间试验对作物产量和质量、土壤质量进行的已知和未知的研究以及需要阐明的研究空白

Fig.3 Model showing known and unknown research that have been conducted under pot and field experiments on crop yield and quality, soil quality and research gaps that need to be elucidated

注：COOH，羧基；OH，酚羟基；HMW，高分子量；LMW，低分子量；WHC，持水量；CEC，阳离子交换容量。

5 结论

本文揭示了 HA 的施用对作物农艺性状和土壤质量具有潜在的显著影响，明确了 HA 在作物和土壤上发挥效果的影响因素，其中影响最大的是 HA 的来源。HA 的化学和分子结构、溶解度以及其他因素（例如施用量、土壤和作物类型）也会影响 HA 在作物上的施用效果。本文通过对实验室和田间试验的评估，明确了 HA 对作物农艺性状和土壤健康的影响，也明确了 HA 方面亟待研究

探讨的知识空白。在确定的田间条件下，优化 HA 不同用量和矿质养分的复合效应研究还需要加强。更重要的是，为了真正揭示 HS 的好处，适宜于不同土壤类型、作物和不同气候类型的长期研究还有待于加强。

参考文献（略）

译自：Frontiers in Agronomy, 2022, 4: 8486 21。