山东农业大学学报(自然科学版),2026,57(4):787-796 VOL.57 NO.4 2026
Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition) doi:10.3969/j.issn.1000-2324.2026.04.019

利用农林废弃物氧化合成生化黄腐酸的研究进展

马雨彤[1,2],陈 浩[1],袁佳慧[1],刘之广[2],汪 玉[1],张 明[3,4*]

1. 中国科学院南京土壤研究所,土壤与农业可持续发展全国重点实验室,江苏 南京 211135
2. 山东农业大学资源与环境学院,山东 泰安 271018
3. 安徽省林业科学研究院,安徽 合肥 230031
4. 安徽黄山森林生态系统定位观测研究站,安徽 合肥 230031

摘 要: 黄腐酸(fulvic acid,FA)是腐植酸中分子量最小、活性最强的组分,富含多种极性官能团,在改善土壤结构、增强养分供给及促进作物生长等方面展现出重要作用。近年来,随着农业绿色发展转型的加速,利用农林废弃物通过氧化法等技术途径合成生化黄腐酸(biochemical fulvic acid,BFA)成为研究热点。本文系统综述了黄腐酸的结构特征、功能属性及其生化合成技术路径,重点聚焦于氧化法过程中的结构调控机制与功能产物形成规律,阐述了其在盐碱地修复、作物生长促进与品质提升等方面的应用进展,并且评估其应用潜力。通过梳理当前研究成果,旨在明确构建绿色高效BFA制备工艺的关键技术路径,为BFA的规模化制备及其在土壤-植物系统中的资源化利用提供理论基础与实践参考。

关键词: 生化黄腐酸;农林废弃物;氧化法;结构功能;应用潜力

中图法分类号: X712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2324(2026)04-0787-10

Research Progress on Synthesis of Biochemical Fulvic Acid via Oxidation of Agricultural and Forestry Wastes

MA Yu-tong[1,2], CHEN Hao[1], YUAN Jia-hui[1], LIU Zhi-guang[2], WANG Yu[1], ZHANG Ming[3,4*]

1. *Institute of Soil Science/Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing 211135, China*
2. *College of Resources and Environment/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China*
3. *Anhui Academy of Forestry, Hefei 230031, China*
4. *Anhui Huangshan Forest Ecosystem Observation and Research Station, Hefei 230031, China*

Abstract: Fulvic acid (FA) is the component of humic acid with the smallest molecular weight and the strongest activity. Rich in various polar functional groups, it plays a crucial role in improving soil structure, enhancing nutrient supply, and promoting crop growth. In recent years, with the accelerated transformation toward green agricultural development, the synthesis of biochemical fulvic acid (BFA) from agricultural and forestry wastes through oxidation and other technological pathways has become a research hotspot. This paper systematically reviews the structural characteristics, functional properties, and biochemical synthesis pathways of fulvic acid, focusing on the structural regulation mechanism and the formation law of functional products during the oxidation process. It also elaborates on the application progress of BFA in saline-alkali soil remediation, crop growth promotion, and quality improvement, and evaluates BFA's application potential. By summarizing current research findings, this study aims to clarify the key technical pathways for constructing green and efficient BFA preparation processes, and provide a theoretical basis and practical reference for the large-scale preparation of BFA and its resource utilization in soil-plant systems.

Keywords: Biochemical fulvic acid; agricultural and forestry waste; oxidation method; structural function; application potential

农林废弃物是指在进行农林业生产、粮食加工或者林业加工过程中产生的副产品,主要成分包括:纤维素、半纤维素、木质素及单宁等生物质资源。我国作为农业大国,农林废弃物资源规模庞大、种类丰富且分布广泛。据统计,我国每年仅秸秆产量就达7亿t[1],城乡生活垃圾及人类加畜禽粪便达5.5亿t,林业废弃物约为3.5亿t[2],若叠加其他类型的农林废弃物,总量将更为庞

收稿日期: 2025-09-15 **修回日期:** 2026-06-20
基金项目: 国家自然科学基金(42277026)
第1作者简介: 马雨彤(2001-),女,硕士研究生,研究方向:盐碱土养分保持工作。E-mail:2295294309@qq.com.
***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:ahlyxy2023@163.com

大。然而由于缺乏绿色高效的处理技术，大部分农林废弃物仍以露天焚烧、自然分解或直接还田等传统方式处理，不仅利用率低下、浪费资源，还导致严重的环境污染，对生态产生威胁[3]。若能将农林废弃物转化为绿色修复材料，不仅可实现废弃物的资源化利用，还可有效缓解土壤退化问题，对可持续发展以及绿色生态有重要意义[4]。

腐殖质是生物质残渣在长期分解转化过程中形成的黑色或暗棕色的高分子化合物，是土壤有机质的重要组成部分，约占土壤有机质的80%~90%，其主要成分为腐植酸（Humic Acids，HA）、黄腐酸（Fulvic Acid，FA）以及少量胡敏素（Humin，HM）[5]。HA是一类由芳香族以及多种活性官能团组成的功能型天然高分子化合物，具有弱酸性，良好的阳离子交换性以及吸附、络合能力。FA作为腐植酸的重要组成部分[6,7]，既能改善土壤结构，又可调控土壤养分，刺激作物生长，促进作物抗逆，并改善品质[8]。但天然黄腐酸形成过程缓慢，传统生产多依赖矿物提取，存在提取难度大、成本高的问题，难以满足大规模农业应用需求。因此，利用农林废弃物合成生化黄腐酸（biochemical fulvic acid，BFA）成为当前解决资源浪费与土壤修复需求的核心方向，也是未来农业绿色发展的重要研究热点。

为深入理解和高效制备BFA，本研究系统阐述BFA组成结构与理化性质，论述其主要合成技术路径，重点聚焦氧化法的结构调控机制与产物形成规律，评述其在土壤改良、污染修复及作物生长调控等领域的应用进展与潜力。同时，本文还进一步分析了当前利用农林废弃物制备BFA所面临的挑战，并对未来发展趋势进行展望，旨在为废弃物资源的高效利用提供理论依据与实践指导。

1 黄腐酸的组成与理化特征

1.1 黄腐酸组成

FA是自然界中广泛存在的一类物质，比HA具有更高的羧基含量和更低的平均分子量，能溶于水、稀酸、稀碱及乙醇、丙酮等多种有机溶剂。FA主要由碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）和硫（S）等元素组成[9,10]，其中C和O元素的含量范围分别为42%~67%和25%~45%，显著高于H、N和S，是决定其结构特征和功能活性的主要元素[11]。FA独特的生物化学活性、理化性质及功能多源于其成分，在发挥生物功能的过程中，分子结构中特定官能团不止通过单一作用机制起效，通过与土壤中的N、P、K及中微量元素（如铁、锌、钙等）发生络合或螯合反应以提升养分的有效性与植物吸收效率，同时通过调控植物体内赤霉素、生长素等激素的合成与信号传导路径以调节细胞分裂与伸长[12]。FA还能通过改变根际土壤中有益微生物（如固氮菌、解磷菌）的群落结构与代谢活性以优化土壤微生态环境，正是通过上述多维度、协同性的作用方式，这些特定官能团最终介导了植物生长促进、抗干旱、盐碱、病虫害等非生物与生物胁迫的综合效果[13]。

1.2 黄腐酸理化特征

FA结构复杂且呈高度异质性，因此难以用单一方法进行精确表征。目前常采用化学分析、光谱分析与物理方法相结合的策略，综合描述其主要特征。从分子结构来看，其三维结构中常通过酯键、醚键和酰胺键等相互连接[14]，这样的结构赋予其多种生态功能，使其在土壤污染修复、植物代谢调控和生长促进等方面发挥重要作用[15]。此外，FA的结构具有良好的环境响应性，其官能团活性随pH和温度的变化而发生显著改变，如在酸性条件下，FA中的羧基和羟基易发生解离反应，从而增强其对金属阳离子的吸附能力；而碱性条件则改变其表面电荷分布，影响其络合能力；高温更可能导致芳香环结构断裂，进而影响其稳定性与功能特性[16]。

2 黄腐酸类物质的合成路径与机理研究

2.1 黄腐酸的分类与研究进展

FA根据来源可分为矿源黄腐酸（mineral fulvic acid，MFA）与BFA两大类（图1）。MFA主要从褐煤、风化煤和泥炭等低阶煤中提取[17]；BFA则利用动植物残体、有机废弃物、畜禽粪便等生物质原料，经生物或非生物过程转化而成。近年来，众多研究表明，BFA在土壤改良、污染修复和作物养分吸收促进等方面具有显著效果[18,19]。

传统FA提取以矿源为主，如以褐煤为原料，采用纳米氧化铜为催化剂，利用过氧化氢（H_2O_2）在微波辅助下对褐煤进行氧化处理，所制得的产

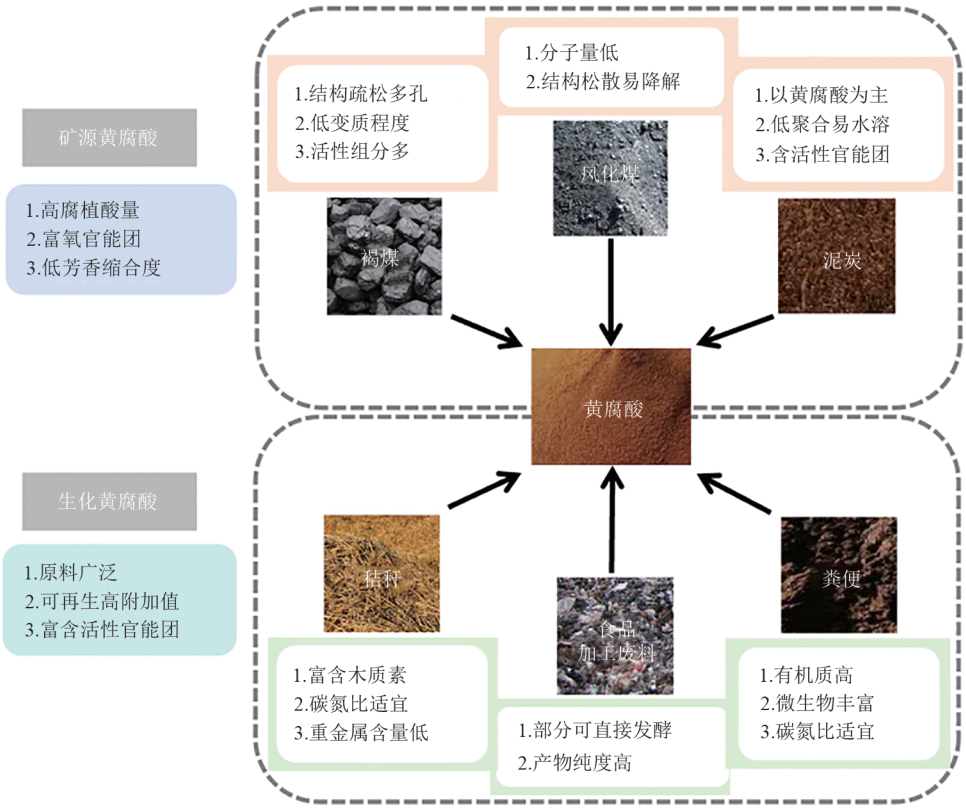


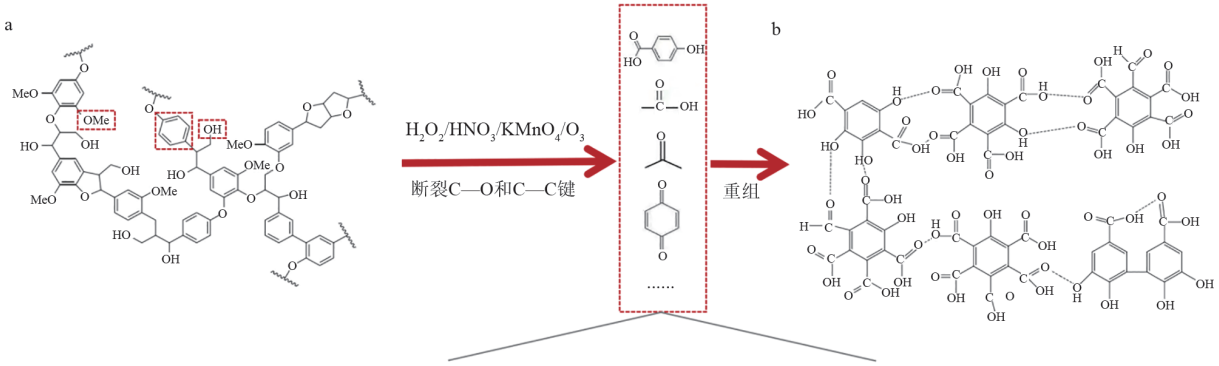
图 1 黄腐酸的分类及原料主要特征

Fig. 1 Classification of fulvic acid and key characteristics of raw materials

物富含羧基、酚羟基、醇羟基和羰基等含氧官能团，且随着相对分子质量增加，官能团数量逐渐减少[20]。相比之下，以农林废弃物（如秸秆、禽畜粪便、有机垃圾等）为原料制备的 BFA 具有可再生性强、环境友好、原料丰富和成本低廉等优势。如以醋渣为原料，采用碱热水热反应合成的 BFA，通过红外光谱、元素分析与核磁共振波谱等手段表征结构发现，该产物与矿源黄腐酸在结构和功能基团组成上具有较高相似性，FA 产率可达 10.51%[21]。因此，尽管 BFA 与 MFA 在具体功能和应用范围上可能存在差异，但二者均具备 BFA 的典型特征。随着矿源资源日趋枯竭及其提取成本不断上升，BFA 替代 MFA 成为重要应用方向。

2.2　传统单一氧化剂氧化法合成 BFA 的技术特征与产物调控

氧化法是当前合成 BFA 的主流方法之一，具有反应条件温和、反应效率高、产物官能团丰富等特点。传统氧化法通常利用单一氧化剂（如 H_2O_2、硝酸（HNO_3）、高锰酸钾（$KMnO_4$）、臭氧（O_3）等）破坏生物质原料中木质素、纤维素等大分子的复杂结构，断裂 C—O 和 C—C 键，释放出具有羧基、羟基、醌基等极性官能团的小分子产物，从而形成 FA 类物质（图 2）[22]。不同氧化剂种类对产物结构的影响存在差异。如图 2 所示，H_2O_2 可显著提高 FA 中羰基、羧基和氧烷基的含量，同时降低芳香碳和烷基结构的含量；$KMnO_4$ 则会提高烷基碳和芳香碳比例，降低芳香度；HNO_3 氧化可形成多种脂肪族二羧酸、羟基苯甲酸、苯羧酸及硝基化合物等产物[23]。此外，反应条件如温度、pH、反应时间及催化剂类型也对最终 FA 的结构特征和转化效率具有重要影响。李艳玲等[24]将黑龙江褐煤及麦秸秆混合物在 10% HNO_3 溶液中共热氧化，制备了混合物 HA，所得混合 HA 中的 FA 含量（37.46%）高于理论值（32.66%），含氧官能团达 41.87%，亦显著高于理论值（37.29%）。此外，Xu 等[25]开发了一种低温氧化技术（150 ℃，O_2 催化），成功将秸秆残渣高效转化为腐殖酸产物，仅 4 h 反应时间内产率达 31.25%，且产物结构特征与天然矿源腐殖酸高度相似，表明该技术具有良好的工业应用前景。尽



c

氧化剂 Oxidizers	官能团变化 Functional group changes	碳结构变化 Carbon structure changes
H_2O_2	↑羰基(C—O)、羧基(—COOH)氧烷基(C—O—C)	↓芳香碳、↓烷基碳
HNO_3	↑羧基(—COOH)、酮基(C═O)	↑烷基碳、↑芳香碳
$KMnO_4$	↑硝基(—NO_2)、羧基(—COOH)	↓芳香碳，脂肪族碳重排
O_3	↑羧基(—COOH)、醛基(—CHO)	↓芳香碳，↑脂肪族片段

图2 氧化合成原理及不同氧化剂对产物结构影响

Fig. 2 Oxidation synthesis mechanism and effects of different oxidants on product structure

注：a来自熊兴泉等[26]，b来自Schnitzer提出的黄腐酸结构模型[27]，c来自Van Duuren et al[23]。

Note: a is cited from Xiong Xing-quan et al.[26]; b is derived from the fulvic acid structural model proposed by Schnitzer[27]; c is cited from Van Duuren et al.[23].

管氧化法在效率和产率方面表现优异，但仍存在一定局限，如氧化剂的环境风险、副产物控制难、后处理成本高等问题。因此，需进一步优化催化体系，探索多氧化剂复配策略或与生物法联用，以提升其环境友好性与经济可行性。

2.3　芬顿氧化法合成的关键机制

在氧化法合成FA的技术体系中，芬顿氧化因能实现生物质原料的高效转化，成为近年来的研究热点，实验遵循“底物-过程-控制因素-产物”的完整转化链条、相关机制与研究进展，本文将以海藻（Enteromorpha prolifera，EP）及木质纤维素类生物质为例对氧化合成过程进行明确阐释。选取的两类研究分别以高含水量（80%~90%）的EP（主要成分为多糖、蛋白质）和玉米秸秆（主要成分为纤维素、半纤维素、木质素）为原料，通过芬顿试剂（Fe^{2+}与H_2O_2组合）引发反应，其中Fe^{2+}催化H_2O_2分解生成高活性羟基自由基，这是整个转化过程的起点与关键[28,29]。自由基优先攻击生物质大分子中的弱键，如多糖的糖苷键、蛋白质的肽键，以及木质素的醚键（C—O—C）和纤维素的β-1，4糖苷键，使大分子降解为小分子片段，包括糖、还原糖、氨基酸、酚类化合物等；随后，这些小分子在羟基自由基及反应过程中生成的其他自由基作用下，发生降解-聚合反应，具体表现为芳香化、酰胺化与羧基化-酚类化合物氧化为醌类后与氨基酸的氨基发生羰基-氨基缩合形成N杂环结构，糖衍生物通过脱水、环化生成呋喃类中间体，最终聚合为类黄腐酸（FLA）或FA，且富含—COOH、—OH等含氧官能团，与天然FA结构特征高度匹配。

2.4　生物发酵、水热处理与热解等其他制备路径研究现状

除氧化法外，生物发酵、水热处理与热解等方法也被广泛用于BFA的制备。其中，生物发酵法具有过程温和、成本低、环境适应性强等优势，常用于农林废弃物资源化利用。Zhong等[30]将秸秆分别采用氨化、厌氧和好氧处理后提取腐殖质类物质，所得HA和FA对Cd、Cu、Zn、Pb等重金属具有良好的螯合去除能力，去除效率分别达96.18%、82.75%、60.43%、41.66%。Ban[31]以水稻秸秆为原料，应用水热腐殖化技术制备人工腐殖酸，并成功合成其衍生物人工腐殖酸尿素，为氮肥高效利用提供新材料支撑。陆淑芬等[32]研究发现，在棉秆堆肥发酵温度为35 ℃、发酵时间15 d、提取温度50 ℃、提取时间2 h条件下，BFA产率可达40.39%。综上所述，不同方法均可实现农林废弃物向BFA的高值转化。应根据目标产物特性、原料类型及应用场景等因素，合

理选择或优化合成路径，以实现绿色、高效、可持续的制备目标。

3　生化黄腐酸的农业应用

3.1　盐碱土改良

FA 具有调节土壤酸碱度、改善盐碱地理化环境等多种功能。孙燕等[33]系统研究了 BFA 对不同质地（砂质壤土和壤质砂土）苏打盐碱土的改良作用机制，通过室内一维垂直入渗试验，探讨了不同 BFA 施加量（0、1、2、4、8 $g \cdot kg^{-1}$）条件下土壤水盐运移特征、入渗模型参数及土壤主要盐离子组成的变化，结果表明，与 CK 相比，BFA 施加量为 1、2、4、8 $g \cdot kg^{-1}$ 时的累积入渗量分别减少了 3.70%、10.19%、12.04% 和 25.00%，说明 BFA 有助于改善土壤水盐调控能力。冯莉杰等[34]从 HA 的物理及化学特性出发，系统综述了其在土壤改良中的作用机制与应用成效，研究指出，HA 可促进土壤团粒结构形成（粒径大于 0.25 mm 的大团聚体占比可达 20.24%~63.98%）、降低土壤碱化度（4.60%~27.20%）、降低盐分积累（Na^+ 和 Cl^- 分别降低 15.40~42.70%、20.70~37.90%）、增强微生物及土壤酶活性，并提高土壤养分有效性。Ibtisam 等[35]在盐碱地开展田间试验，发现 FA 处理显著促进大麦幼苗生长并提高籽粒产量，增幅达 49.17%，进一步探讨了 FA 与氮肥对盐渍土土壤有机碳与团聚体特征的影响，发现 FA 能有效降低耕层盐分，显著改善土壤结构和稳定性：在小麦季和水稻季，氮肥施用量为 300 $kg \cdot hm^{-2}$ 时，FA 处理下土壤中直径>2 mm 水稳性大团聚体含量分别较对照增加 18.60% 和 13.80%；团聚体平均重量直径相较当地常规施肥提高了 38.00%；此外，在围垦初期，氮肥对有机碳含量的提升作用超过 FA 处理。通过以上研究发现，FA 施用可有效降低土壤表层盐分、增加水稳性团聚体含量、提高土壤有机碳水平，并显著促进盐碱地作物产量，将 FA 与适宜施用量的氮肥相结合，是治理轻中度盐碱土壤障碍的可行施肥策略。

3.2　土壤重金属修复

FA 中含有大量的活性官能团，具有交换与吸附土壤重金属的能力，能够对重金属进行配位螯合，从而改变土壤重金属的存在形态与其生物活性，广泛用于重金属污染修复[36]。张璟钰等[37]施加不同质量分数 BFA 到汞污染的土壤，发现 BFA 可显著降低土壤汞浓度浸出值，改变土壤汞形态，且效果随 BFA 含量的升高而提高。铁锰氧化物结合态汞、残渣态汞含量降低，最高变化幅度分别为 2.02% 及 14.09%，而可交换态汞、碳酸盐结合态汞、有机结合态汞仅略微升高。刘佳欣[38]研究发现黄腐酸有机肥不仅可以保持土壤肥力促进作物生长发育，还能够提高小麦在 Hg 单一污染和 Pb、Hg 复合污染两种模式下的发芽率（15.34% 和 19.27%），提高了土壤有机质的含量，改善土壤 pH，并且减少小麦植株对重金属 Hg 的摄取。任煊静等[39]进行土壤培养实验研究发现单独添加 BFA 对土壤石油烃污染有修复作用，可使石油烃的降解率提高至 70.20%（5% BFA）。Jiang 等[40]进行了为期三年的田间试验，探究 FA 对锰铜过量土壤的修复效果及机理，发现外源施加 FA 显著降低了土壤锰和铜的含量（22.40% 和 28.04%），增加了钙的含量，提高了该地区苹果的产量（21.39 %）。

3.3　农业可持续发展

近年来，化肥与农药的滥用导致环境、水源以及土地污染严重，土壤的水、肥、气、热等条件恶化，使土壤板结，养分贫瘠，有益微生物数量大幅下降，生态平衡被破坏，甚至农产品中的重金属、亚硝酸盐等有害物质含量升高，从而对人类的健康及生存造成严重威胁[41]。BFA 与肥料进行配施会起到增效作用（提氮、促磷、活钾），进而减少化肥的使用，改善土壤的理化性质，提高作物产量。东强[42]研究发现缓释尿素和 FA 混施可增强黑青稞光合特性，提高黑青稞开花后各时期的光合性能，促进黑青稞光合产物的生产和积累，进而可以提高叶片、穗轴、颖壳和籽粒的干物质分配率，降低茎秆和鞘的干物质分配率，提高籽粒中氮素含量，从而增加黑青稞产量。陈琪等[43]研究表明，包膜磷酸二铵及配施 FA 也可提高小麦各生育期土壤有效磷含量，较等量 P 处理可提高小麦产量 24.00%。史小婉等[44]研究发现黄腐酸钾部分代替硫酸钾相较于单施硫酸钾能够显著提高烟草的农艺性状（最大叶长在团棵期增加可达 6.80%）、养分含量、酶活、产量（11.59%）、品质与经济性状（香气质较好、香气量较足、口感丰富，余味舒适）。此外，BFA 还是农

药缓释增效剂，它可以通过物理化学作用与农药形成农药-FA复合物。与化学农药混用，可减少1/3的化学农药用量，既可降低农药毒性、减少农药用量，提高防效，降低对有益生物的杀伤力，提高对人畜的安全性，又可减少环境污染，有利于保护环境和维持生态平衡[45,46]。综上，由农林废弃物制备而成的BFA在土壤改良及作物生长方面应用前景广阔，有利于农业可持续发展。

4 生化黄腐酸在土壤-植物系统中的应用潜力

BFA作为土壤有机质中分子活性最高、周转效率最快的关键组分，其在改良土壤结构、调控微环境及促进作物生长等方面具有多重生态功能（图3）。在土壤结构改良维度，BFA通过静电吸附与土壤黏粒、粉粒颗粒形成稳定的水稳性团粒结构；在作物生长促进方面，BFA的调控作用贯穿作物全生育期：苗期可通过激活根系细胞分裂素与生长素合成，促进根系伸长与根毛分化，增加根系表面积；生育期可通过促进叶绿体合成，同时激活抗氧化酶系统，提升作物对干旱、盐碱等非生物胁迫的抗性；成熟期则通过调节内源激素平衡延缓叶片衰老，延长籽粒灌浆期，最终实现作物产量提升与品质优化。

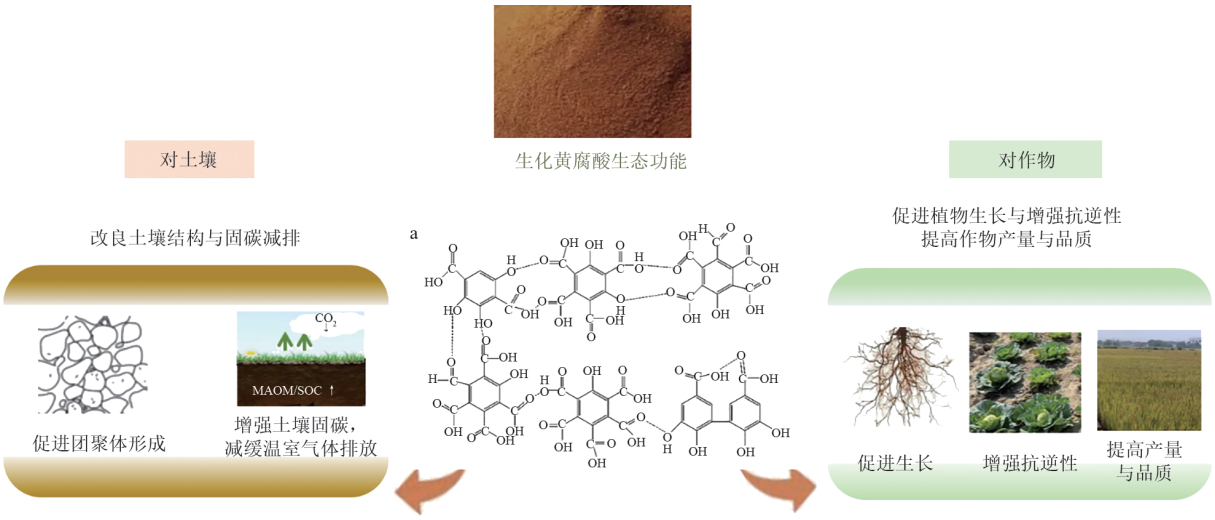


图3 BFA的生态功能

Fig. 3 Ecological functions of BFA

注：图a来自于Van Duuren et al。

Note: Fig.a is from Van Duuren et al.

4.1 土壤碳汇潜力

BFA具有较强的亲水性和较多极性官能团，可促进矿物结合态有机碳（mineral-associated organic matter，MAOM）形成，增强土壤有机碳稳定性并提升土壤碳汇功能。目前已经有研究证实其支撑碳汇潜力。Li等[47]研究表明，腐殖质衍生小分子可显著降低土壤交换性钠含量，提高阳离子交换量，从而促进MAOM和颗粒态有机碳（POM）积累，其^{13}C标记MAOM占新增土壤有机碳的比例高达73.97%~92.67%。Renata Jarosz等[48]也指出，HA施用使土壤中总有机碳含量增加33.00%，非水解性腐殖质化合物含量提升达到59.00%。此外，Liu等[49]研究表明FA与膨润土联合使用可将土壤有机碳矿化率减少32.20%，显著提高土壤有机碳固定能力。马盼等[50]指出，HA通过光催化聚合反应提高土壤结构稳定性，降低土壤微生物呼吸强度，促进碳固定并减少CO_2排放。此外，FA还常被用作肥料增效剂，通过提高化肥的利用率、减少施肥频次，间接减少温室气体排放。

BFA可通过黄腐酸的羟基、羧基与土壤胶体（如黏粒、粉粒）通过静电吸附、氢键结合形成稳定复合体，进而促进土壤大团聚体（直径>0.25 mm）的形成与发育[51]，这种团聚体结构不仅能提升土壤抗侵蚀能力，有助于保持土壤通气性和透水性，还能为植物根系提供良好的生长环境[52]。马栗炎等[53]研究发现，FA处理下土壤中直径>2 mm水稳性大团聚体含量相较于不施肥

对照增加 18.60%，土壤团聚体平均重量直径较常规施肥增加 38.00%。此外，FA 的施用还可提高土壤总孔隙度和毛管孔隙度，改善土壤的通气性和保水性，减少土壤压实程度，有利于作物根系生长与水肥利用效率提升[54]。其分子中的羟基和羧基也可有效吸附并保持水分，显著提高田间持水量和饱和持水量，尤其适用于干旱和半干旱地区的土壤改良[55]。

4.2　作物抗逆增产潜力

BFA 通过调控植物生理代谢与土壤微环境，在作物抗逆（非生物胁迫）与产量品质提升方面呈现出多元潜力，其作用贯穿作物全生育期，其对植物的刺激效应主要表现在促进根系发育、增强光合作用及提升抗逆能力[56]。Qiu 等[57]研究发现，FA 可改变大豆根系分泌物以及根系微生物组成，促进异黄酮类化合物（如染料木黄酮、生物素 A 等）合成；Lv 等[58]研究表明，FA 处理显著提升水稻叶绿素含量、植株干重和根冠比，并改善根系几何性状（总根长、表面积、体积等）。此外，BFA 可显著增强植物的光合作用。孔繁荣等[59]研究发现，黄腐酸钾处理能显著提升植物叶面积、鲜重、干重、叶绿素含量及超氧化物歧化酶、过氧化物酶等抗氧化酶活性，净光合速率提高 17.86%。Zhi 等[60]进一步指出，FA 通过上调光合相关基因（如 Mg-CHLI、Rubisco 合成酶）表达，分别促进 C_4 植物和 C_3 植物的光合作用，使玉米和生菜的净光合速率分别提升 46.50% 和 88.00%。刘英超等[61]研究表明，喷施 FA 后，小麦叶片细胞膜相对透性下降 8.30%，脯氨酸含量提升 17.55%，分蘖节和叶片中的可溶性糖含量均有提高，有助于提升小麦抗寒性。

4.3　产业化应用潜力

BFA 从实验室研究走向规模化农业应用，需突破原料预处理、生产工艺与田间施用标准化三大核心瓶颈，同时挖掘其在产业化中的成本优势与场景适配性。在规模化生产工艺优化方面，当前 BFA 制备多以农林废弃物（如秸秆、果壳）为原料，但预处理成本较高，未来可探索低成本预处理技术。

从可行性方面看：从经济性看，以玉米秸秆、果壳等农林废弃物（我国年秸秆产量约 7 亿 t）为原料，采用氧化法合成 BFA 总成本低于矿源黄腐酸，但制备所得的黄腐酸市场价值会进一步提高，具备经济优势；从产业化可行性看，我国农林废弃物产量巨大[1]，可支撑 BFA 规模化产能，可通过“原料就地预处理+区域集中加工”进行集中处理，相关制备方法的不断改进升级为产业化落地提供技术与资源支撑。

BFA 不仅能促进作物生长发育，还可显著提高作物品质。Capstaff 等[62]研究表明，FA 处理显著提高芸豆植株干重和产量，产量增幅高达 49.99%。张亚飞等[63]证实施用黄腐酸钾能有效促进桃树幼苗的生长发育。王玉琪等[64]在设施栽培番茄施用 FA 后，单株果实产量和单位面积产量有明显增加，表明 FA 在设施农业中具有良好应用前景。

在作物品质方面，FA 的促进作用也已被大量研究所证实。刘彩娟等[65]研究发现，FA 处理可显著提高黄瓜果实中维生素、游离氨基酸、可溶性固形物和可溶性蛋白质含量，同时降低单宁水平，明显改善整体品质。魏世晋[66]将黄腐酸钾用于樱桃番茄栽培，结果显示其在不同生长阶段均促进株高、茎粗和叶面积增长，果实中维生素 C 和可溶性糖含量分别提高 8.21% 和 42.74%。杨梦宇[67]研究表明，与对照相比，FA 处理显著提高苹果可溶性糖和维生素 C 含量，增幅分别为 11.82%、19.74% 和 14.85%、29.71%，同时可滴定酸含量下降 18.18% 和 30.30%，显著改善果实风味和营养品质。

5　存在的问题及未来展望

尽管 FA（特别是农林废弃物制备的生化黄腐酸）在改善土壤健康、助力农业可持续发展领域展现出显著潜力，且以氧化法为核心的合成技术在提升产物产率与功能活性上取得了阶段性突破，但当前研究与产业化进程仍面临多重瓶颈。从制备环节来看，氧化法合成过程中易产生多种无效副产物，不仅降低目标产物纯度，还增加后续分离提纯难度；同时，原料预处理、反应条件控制及产物精制等环节能耗较高，导致其制备成本偏高，制约了规模化生产。从应用与管理层面而言，目前腐植酸类肥料缺乏统一的产品质量标准体系，易出现产品质量参差不齐、市场监管困难的问题，进而影响其在农业生产中的应用效果与信任度。并且，生化黄腐酸与土壤理化性

质、根际微生物群落之间的互作机制尚未完全明晰，现有研究多集中于宏观功能表现，对分子水平的作用路径、信号传导及调控网络阐释不足，导致其施用方案难以实现精准化、个性化，无法充分适配不同区域土壤类型与作物生长需求。

针对上述问题，未来生化黄腐酸的研究与产业发展应聚焦核心瓶颈，从技术创新、机制探索及应用示范等维度协同推进。在制备工艺优化方面，需重点开发低能耗、高效率的氧化法改良技术，例如通过筛选新型高效催化剂、优化反应温度、压力及氧化剂配比等条件，减少副产物生成，提升目标产物选择性；同时，探索农林废弃物预处理与转化的一体化工艺，提高原料利用率，降低单位产品能耗与成本，增强产业化可行性。在作用机制深化上，应借助分子生物学、土壤生态学、代谢组学等多学科交叉技术，深入解析生化黄腐酸与土壤胶体颗粒的吸附-解吸规律、对微生物群落结构与功能的调控机制，以及对作物生理代谢通路的影响，明确其在土壤-微生物-作物系统中的关键作用节点，为制定科学的施用剂量、时期与方式提供理论支撑。在技术集成与区域示范方面，应结合不同区域的土壤质地（如东北黑土、华北盐碱土、南方红壤）、气候条件及农业种植模式，开展生化黄腐酸改良剂的规模化田间示范试验，总结不同场景下的最佳应用参数，形成可复制、可推广的技术方案与操作指南，推动其从实验室研究向农业生产实际应用的高效转化，充分发挥其在土壤改良、作物增产提质中的核心作用。

参考文献

[1] 刘 婉,袁 芳,曾慧聪,等.农林废弃物生物炭的制备及其应用进展[J].生物化工,2024,10(03):251-256.

[2] 陈一良,宋文旭,洪桐潇,等.利用农林废弃物创制水处理功能材料的研究进展[J].环境工程,2026,44(01):168-176.

[3] 张佳慧, 邹洪涛, 苏沛瑶, 等. 利用农业废弃物制备环境友好型包膜缓释材料的研究[J].中国土壤与肥料, 2025(02):214-227.

[4] 许铭宇, 俞龙生. 农林废弃有机材料对离子型稀土矿尾砂的土壤改良效应[J].生态环境学报, 2025, 34(01):126-134.

[5] Krivdin L B. Liquid-phase NMR of humic and fulvic acids[J]. Magnetic Resonance in Chemistry, 2024, 63(2): 128-150.

[6] Haghighi M. The effect of humic and glutamic acids in nutrient solution on the N metabolism in lettuce [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(15): 3023-3028.

[7] 王建恩.夏玉米/冬小麦矿源黄腐酸钾和腐植酸钾施用效应研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2024.

[8] Jindo K, Martim S A, Navarro E C, et al. Root growth promotion by humic acids from composted and non-composted urban organic wastes[J]. Plant and Soil, 2012, 353 (1-2):209-220.

[9] Retraction. Use of ore-derived humic acids with diverse chemistries to elucidate Structure-Activity Relationships (SAR) of humic acids in plant phenotypic expression.[J]. Frontiers in Plant Science, 2022,13:966035.

[10] 罗鑫源.鸡粪好氧/厌氧发酵过程对腐植酸类物质组成与结构的影响[D]. 济南:齐鲁工业大学, 2024.

[11] 周丽平, 袁 亮, 赵秉强, 等. 腐植酸的组成结构及其对作物根系调控的研究进展[J]. 植物营养学报, 2022, 28(02): 334-343.

[12] Lu Q H, Xu Z D, Zhang Q H, et al. Foliar application of Fe-fulvic acid: A strategy to reduce heavy metal accumulation and enhance nutritional quality[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101904.

[13] Zhang M M, Li X Y, Wang X L, et al. Potassium fulvic acid alleviates salt stress of citrus by regulating rhizosphere microbial community, osmotic substances and enzyme activities[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1161469.

[14] Alvarez-Puebla R, Valenzuela-Calahorro C, Garrido J. Theoretical study on fulvic acid structure, conformation and aggregation[J]. Science of the Total Environment. 2004, 358(1):243-254.

[15] 刘晓英, 刘世宾, 刘志华, 等. 腐植酸强化微生物去除土壤重金属和多环芳烃研究进展[J]. 土壤, 2025, 57(02):247-257.

[16] Tan L, Gutierrez L, An M. et al. Comparative study of fouling in hollow fiber and flat sheet nanofiltration membranes by three organic foulants: Insights into configuration impact on fouling[J]. Desalination, 2025, 613, 118996.

[17] 谢俊彪, 尚蕴果, 朱明娟, 等. 不同类型腐植酸肥料对土壤养分供应与种子萌发的影响机制[J]. 种子科技, 2025, 43(04):195-197.

[18] 李秀颖, 叶 华, 刘变变, 等. 矿源黄腐酸的提取工艺研究[J]. 腐植酸,2016(05):24-27.

[19] 柳文娜, 李艳玲, 刘 鹏, 等. 生化腐植酸的制备与应用研究进展[J]. 腐植酸,2024(04):7-22.

[20] Gong G Q, Li Z L, Zhang Y J, et al. Preparation and structural characterisation of coal-based fulvic acid based on lignite [J]. Journal of Molecular Structure, 2022, 1260: 132766.

[21] Zhu Y Y, Tang R J, Cao Y T, et al. Unlocking the potential of vinegar residue: a novel biorefining strategy for amino acid-enriched xylooligosaccharides and humic-like acid[J]. Waste Management, 2025, 192: 20-28.

[22] 刘玉兰, 罗永鑫. 从天祝褐煤中以催化混酸氧化降解法提取黄腐酸及其应用[D]. 甘肃:兰州铁道学院, 2003.

[23] van Duuren F L,Warren B L. Nitric acid oxidation of coal: part I. identification of some components of the ether-soluble fraction[J]. South African Journal of Chemistry,1920,3(2): 67-72.

[24] 李艳玲, 陈 曦, 张翠清, 等. 麦秸秆与黑龙江褐煤共热氧化法制备腐植酸及其结构分析[J]. 燃料化学学报. 2023,51(02): 145-154.

[25] Xu M, Chen P, Wang J. et al. Oxygen-promoted low-temperature hydrothermal conversion of Chinese medicinal herbal residues into humic acids[J]. Carb Neutrality, 2025, 4(1): 13.

[26] 熊兴泉,张 辉,高利柱. 木质素的功能化与应用研究进展[J]. 应用化学,2023,40(06):806-819.

[27] Knyazev D A, Fokin A D, Ochkin A, et al. Free-radical condensation as a natural mechanism of the formation of humic acids[J]. Frontiers in Plant Science, 2009, 42: 984-988.

[28] Cai D Q, Lu Y Z, Zhu Y P, et al. Inducing hour-level humification of Enteromorpha prolifera to fabricate fulvic-like acid fertilizer with Fenton's reagent[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 5860.

[29] Sheng Z, Wang J, Yang T H, et al. Fenton-assisted neutral hydrothermal humification for lignocellulosic biomass to fulvic acid[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 521: 166754.

[30] Zhong X B, Yang Y J, Liu H X, et al. New insights into the sustainable use of soluble straw humic substances for the remediation of multiple heavy metals in contaminated soil[J]. Science of the Total Environment, 2023, 903: 166274.

[31] Ban Z X, Zhang Y Q, Han W Q, et al. Artificial rice straw-derived humic acids obtained via extraction with highly concentrated alkali solutions or precipitation at lower pH levels exhibit reduced biological activity in promoting maize growth and nitrogen uptake[J]. Industrial Crops and Products, 226, 2025: 120630.

[32] 陆淑芬, 胡绍启, 严成旭, 等. 南疆棉杆黄腐酸制备及对土壤性质的影响[J]. 腐植酸, 2023(06): 49-56+67.

[33] 孙 燕, 吴建鑫, 曲 植, 等. 生化黄腐酸对不同质地苏打盐碱土水盐运移特征的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 74-84.

[34] 冯莉杰, 刘子静, 孙 彬, 等. 简述腐植酸土壤改良最新研究成果[J]. 腐植酸, 2022(06):7-12+33.

[35] Alsudays M I, Alshammarry H F, M. Alabdallah N , 等. 在盐碱地条件下施用腐植酸和黄腐酸对大麦生长和产量的改善作用[J]. 腐植酸,2025(01):51-62.

[36] Song C X, Sun S Q, Wang J T, et al. Applying fulvic acid for sediment metals remediation: Mechanism, factors, and prospect [J]. Frontiers in Microbiology, 2023,131: 084097.

[37] 张璟钰. 黄腐酸联合稳定剂对汞污染土壤修复的模拟应用研究[D]. 上海:华东师范大学,2019.

[38] 刘佳欢. 黄腐酸有机肥对 Hg 单一和 Pb、Hg 复合污染土壤重金属的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2019.

[39] 任煊静. 生化黄腐酸在石油烃污染土壤修复中的应用研究[D]. 上海:华东师范大学,2018.

[40] Jiang W T, Chen R C , Lyu J H, et al. Remediation of the microecological environment of heavy metal-contaminated soil with fulvic acid, improves the quality and yield of apple[J]. Journal of Hazardous Materials,2023,460: 132399.

[41] 王 玉. 绿色化学与农业的可持续发展研究[J]. 山西农经,2018(10):133-134.

[42] 东 强. 缓释尿素配施黄腐酸对隆子黑青稞光合特性、养分吸收及产量的影响[D]. 林芝:西藏农牧学院,2023.

[43] 陈 琪, 刘之广, 张 民, 等. 包膜磷酸二铵配施黄腐酸提高小麦产量及土壤养分供应强度[J]. 土壤学报,2018,55(06):1472-1484.

[44] 史小婉. 钾肥与黄腐酸钾配施对云烟 87 生长及产质量的影响[D]. 武汉:华中农业大学,2024.

[45] 袁瑞江, 姚银娟, 王丽乔, 等. 生物腐植酸(黄腐酸)及其在农业中的应用[J]. 河北农业科学,2009,13(07):36-38+133.

[46] 卢林纲. 黄腐酸及其在农业上的应用[J]. 现代化农业,2001(05):9-10.

[47] Li J W, Chen L, Yue F X, et al. Microbiological

mechanism of lignin- and humus-derived small molecules addition promoting straw conversion into soil organic matter in sodic soil[J]. Pedosphere, 2024, 35(4): 603-616.

[48] Jarosz R, Kowalska JB, Gondek K, et al. The effect of new zeolite composites from fly ashes mixed with leonardite and lignite in enhancing soil organic matter[J]. Agriculture, 2025, 15(7):786.

[49] Liu B, Shen Y W, Tan D S, et al. Enhancing soil organic carbon fixation with modified bentonite composites [J]. Applied Clay Science, 2025, 273: 107837.

[50] 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(04): 793-795+800.

[51] 赵亚玲. 黄腐酸(FA)发酵生产及分离提取的研究[D]. 西安:西北大学,2004.

[52] Ivan K, Kenneth G L, Stina J. Valorization of humic acids by hydrothermal conversion into carbonaceous materials: Physical and functional properties[J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2019, 7(2): 2585-2592.

[53] 马栗炎, 姚荣江, 杨劲松. 氮肥及黄腐酸对盐渍土有机碳和团聚体特征的调控作用[J]. 土壤,2020,52(01):33-39.

[54] Zhang C, Qiao Y, Song Q. Practice of improving saline-alkali soil with bio-humic acid[J]. Processes, 2024, 12(6):1250-1250.

[55] 陈 曦, 刘宝勇, 于 皓, 等. 腐植酸钾协同微生物菌剂对矿区废弃地土壤改良的影响[J]. 土壤, 2024 ,56(04):833-840.

[56] 刘佳欢, 王 倩, 罗人杰, 等. 黄腐酸肥料对小麦根际土壤微生物多样性和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(10):1808-1816.

[57] Qiu X Q, Wang W Q, Yang J S, et al. Fulvic acid promotes legume-rhizobium symbiosis by stimulating endogenous flavonoids synthesis and secretion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72 (12): 6133-6142.

[58] Lv X, Li Q, Deng X, et al. Fulvic acid application increases rice seedlings performance under low phosphorus stress[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24, 703.

[59] 孔繁荣, 李海平, 郭文忠, 等. 干旱低温复合胁迫下黄腐酸钾对西葫芦幼苗生长和生理生化特性的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(01):74-80.

[60] Zhi Y C, Li X N, Wang X W, et al. Photosynthesis promotion mechanisms of artificial humic acid depend on plant types: A hydroponic study on C3 and C4 plants[J]. Science of the Total Environment, 2024, 917: 170404.

[61] 刘英超, 万山平, 程 霞, 等. 黄腐酸生理学功能及促进作物生长机理研究进展[J]. 热带亚热带植物学报,2025,33(06):1-10.

[62] Capstaff N M, Morrison F, Cheema J, et al. Fulvic acid increases forage legume growth inducing preferential up-regulation of nodulation and signalling-related genes [J]. Journal of Experimental Botany, 2020, 71(18): 5689-5704.

[63] 张亚飞, 罗静静, 彭福田, 等. 黄腐酸钾与化肥控释袋促进桃树生长及氮肥吸收利用[J]. 腐植酸, 2019(06):37.

[64] 王玉琪, 梁 颖, 唐 丽, 等. 黄腐酸对不同施氮水平下设施栽培番茄产量、品质和基质微生物的影响[J]. 西北农业学报,2025,34(01):113-122.

[65] 刘彩娟, 吕春雨, 艾希珍, 等. 黄腐酸对干旱胁迫下黄瓜光合特性及产量和品质的影响 [J]. 应用生态学报,2022,33(05): 1300-1310.

[66] 魏世晋, 李 伟, 李永慧, 等. 黄腐酸钾与稻壳生物炭对无土栽培樱桃番茄生长、产量和品质的影响[J]. 西南农业学报, 2025,38(04): 715-724.

[67] 杨梦宇, 杨怡帆, 唐玉薇, 等. 不同施肥处理对苹果果实品质和土壤理化性状的影响[J]. 北方园艺, 2025 (08):123-130.