



· 青年编委专刊 ·

生物炭与丛枝菌根真菌联合应用的效应与机制： 面向农业可持续性与生态修复

徐云剑¹, 谢风燕², 段江媛¹, 黎君梅¹, 刘芳²

(1. 云南大学 生态与环境学院/生物多样性研究院/植被结构功能与建造全国重点实验室/西南跨境生态安全教育部重点实验室/云南省植物繁殖适应与进化生态学重点实验室, 云南 昆明 650504; 2. 云南大学 农学院, 云南 昆明 650504)

摘要 随着全球人口增长与环境压力加剧,开发绿色高效的土壤改良与生态修复技术至关重要。生物炭与丛枝菌根真菌(AMF)因其在土壤改良、碳封存、污染修复及促进植物生长方面的显著潜力成为研究热点。近年研究发现,两者联合应用可产生超越单一应用的协同增效作用。该文系统综述了生物炭与 AMF 联合应用的协同效应及其内在作用机制,并展望了其未来研究方向。研究表明,联合施用能显著改善土壤结构、调控微生物群落、促进作物生长并增强其对干旱、盐碱及重金属污染的抵抗能力。其核心协同机制在于三级联动:生物炭作为“生态位优化器”为 AMF 定殖与功能发挥创造先决条件;AMF 通过分泌球囊霉素并与生物炭形成复合体,共同驱动吸附、活化、转运的养分循环,将生物炭从静态基质转化为动态功能界面;二者联合进一步通过构建高复杂度的微生物互作网络精准调控关键酶活性,系统性地提升土壤-植物系统的养分循环效率与生态系统稳定性。尽管联合应用前景广阔,但其效应受生物炭特性、AMF 菌种及环境条件等因素制约。未来研究应着力于揭示其微观界面过程、评估长期生态安全性并建立精准施用技术体系,以推动该技术从“效应验证”迈向“精准设计”,为实现农业与生态可持续发展提供理论依据与技术支持。

关键词 生物炭;丛枝菌根真菌;协同机制;土壤改良;植物营养;生态修复

中图分类号:X53; Q939.96 **DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbr.2025-06-011

Effects and mechanisms of combined application of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi: Towards agricultural sustainability and ecological restoration

XU Yunjian¹, XIE Fengyan², DUAN Jiangyuan¹, LI Junmei¹, LIU Fang²

(1. State Key Laboratory of Vegetation Structure, Function and Construction, Key Laboratory of Southwest Transboundary Eco-Security of Ministry of Education, Yunnan Key Laboratory of Plant Reproductive Adaptation and Evolutionary Ecology, Institute of Biodiversity, School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650504, China;

2. College of Agriculture, Yunnan University, Kunming 650504, China)

收稿日期:2025-09-01

基金项目:国家自然科学基金(32101358);云南省科技计划项目(202401BF070001-002, 202401AT070434)。

第一作者:徐云剑,男,副教授,从事植物-微生物互作研究,xuyunjian1992@ynu.edu.cn。

通信作者:刘芳,女,讲师,从事植物-微生物互作研究,liufang0019@ynu.edu.cn。

Abstract With the growth of the global population and the intensification of environmental pressure, the development of green and efficient soil improvement and ecological restoration technologies is crucial. Biochar and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) have become research hotspots due to their significant potential in soil improvement, carbon sequestration, pollution remediation, and promotion of plant growth. Recent studies have found that the combined application of the two can produce a synergistic effect that surpasses their individual application. This paper systematically reviews the synergistic effects and internal mechanisms of the combined application of biochar and AMF, and looks forward to their future research directions. Studies have shown that the combined application can significantly improve soil structure, regulate microbial communities, promote crop growth, and enhance crop resistance to drought, salinization, and heavy metal pollution. The core synergistic mechanism lies in a three-level linkage: Biochar acts as an "ecological niche optimizer", creating prerequisites for the colonization and functional exertion of AMF. By secreting glomalin and forming complexes with biochar, AMF jointly drive the nutrient cycle of adsorption, activation, and transportation, transforming biochar from a static matrix into a dynamic functional interface. The combination of the two further systematically improves the nutrient cycling efficiency of the soil-plant system and the stability of the ecosystem by constructing a highly complex microbial interaction network and accurately regulating the activity of key enzymes. Although the combined application has broad prospects, its effects are restricted by factors such as biochar properties, AMF strains, and environmental conditions. Future research should focus on revealing its micro-interface processes, evaluating long-term ecological safety, and establishing a precise application technology system. This will promote the technology from "effect verification" to "precision design", providing theoretical basis and technical support for the realization of sustainable agricultural and ecological development.

Keywords biochar; arbuscular mycorrhizal fungi; synergistic mechanism; soil improvement; plant nutrition; ecological restoration

全球土壤退化、养分失衡及多重胁迫环境对农业可持续性和生态系统安全构成严重威胁。传统土壤改良剂因功能局限和时效性较短,往往难以在生产力提升、胁迫抗性增强和生态修复方面实现协同改善。生物炭凭借其碱性特质、高比表面积、多孔结构及丰富的官能团,已成为一种多功能土壤调理剂^[1];与此同时,丛枝菌根真菌(AMF)能与超过 70% 的陆生植物形成共生关系,可增强植物的养分获取能力和胁迫耐受性^[2]。二者联合应用被证明在改良土壤、提升作物生产力及修复污染方面具有协同增效潜力^[3-7],其核心在于构建“微环境优化、微生物功能模块组装、酶活调控”的机制。本研究系统解析了该机制在土壤修复、作物增产及生态系统稳定性提升中的作用,并探讨了应用瓶颈与未来技术突破方向,以期对未来农业可持续发展和生态修复提供理论依据。

1 生物炭和丛枝菌根真菌概述

生物炭是以植物生物质和动物排泄物为原

料,在缺氧或部分缺氧的高温(200 ℃ ~ 1 000 ℃)条件下经热解形成,是一种富碳有机物^[8]。其物理结构呈现典型的多孔分级体系,扫描电镜观察显示,生物炭孔隙包括微孔(< 2 nm)、介孔(2 ~ 50 nm)和大孔(> 50 nm)^[9]。这种多级孔隙结构赋予生物炭优异的持水能力^[10],而其高比表面积(如玉米秸秆生物炭比表面积达 2 167 m²/g)为物质吸附和微生物定殖提供了丰富界面^[11-12]。此外,傅里叶变换红外光谱分析显示,低温(300 ℃)制备的生物炭富含羟基和羧基,而高温(600 ℃)生物炭则以芳香环结构为主^[13]。这种化学特性使其通过离子交换(如 K⁺、Ca²⁺ 交换)、静电吸附(对重金属阳离子)、表面络合(如与 Cu²⁺ 形成配位键)等机制去除污染物^[14-15]。研究表明,生物炭的碱性特征(pH = 5.0 ~ 12.0)、高比表面积(平均 124.83 m²/g)、发达孔隙结构、丰富表面官能团(如羧基、酚羟基等)及热稳定性使其成为一种多功能土壤改良材料^[16-18],在环境修复等领域展现出显著应用潜力。

AMF 是一类能与 70% 以上的陆地植物形成共生关系的土壤微生物,其典型特征是在宿主植

物根皮层细胞内形成分支结构(即丛枝),构成与植物进行物质双向运输的功能场所^[2]。目前鉴定的 AMF 隶属于球囊霉门(*Glomeromycotina*)球囊菌纲(*Glomeromycetes*)的球囊霉目(*Glomerales*)、多样孢囊霉目(*Diversisporales*)、类球囊霉目(*Paraglomerales*)和原囊霉目(*Archaeosporales*)(<http://www.amf-phylogeny.com/>)。这类真菌以与植物形成专性共生关系为典型特征,其生命周期严格依赖宿主植物提供的碳源,并在宿主根系皮层细胞内形成特化结构——泡囊和丛枝,并利用丛枝与植物进行养分交换^[19-20]。

在生命周期中,AMF 的侵染过程始于宿主植物与真菌的信号识别:当 AMF 孢子感知到宿主根系分泌的独角金内酯信号分子后,会释放菌根因子(Myc 因子),通过 Ca^{2+} 信号介导诱导宿主根系相关基因表达^[21]。这一信号传导启动后,AMF 菌丝开始侵入根系皮层细胞,在细胞间和细胞内分化形成大量菌丝网络^[19]。随着菌丝延伸,部分菌丝会特化形成泡囊和丛枝结构,同时菌丝向根外土壤扩展,形成庞大的根外菌丝体^[22-23]。这些根外菌丝可延伸至根系无法到达的微孔隙,扩大吸收面积^[24]。研究表明,AMF 既能通过加快植物对营养元素的吸收、促进生长发育来直接推动植物生理进程,又能通过增强抗逆性、调节物质循环提升植物环境适应能力;此外,其在促进污染土壤修复及维持生态平衡等宏观生态层面的作用,也进一步凸显了这类共生真菌在植物-土壤-环境互作系统中的枢纽价值。

2 生物炭与丛枝菌根真菌的联合效应

生物炭与 AMF 的协同作用在土壤改良、农业增产、抗逆性调控及生态修复中展现出显著的应用潜力,但其效果受作物种类、环境胁迫类型及施用条件等综合影响。

2.1 土壤改良与微生物调控

生物炭与 AMF 联合施用改善了土壤环境。在物理结构方面,生物炭的多孔性和 AMF 菌丝网络及其分泌的球囊霉素共同作用,显著增强土壤团聚体稳定性和孔隙度。例如,在黑土农田中,AMF 和生物炭联合增加了土壤孔隙度,根际土壤质量指数较对照提高了 49.1%^[4]。在化学性质方面,联合应用能有效调节土壤酸碱度和盐分。例如,施用 5 t/ha 生物炭(由红豆、棉花、玉米秸

秆和牧豆木制备)可使土壤 pH 值从 5.7 提高到 6.3^[25],为 AMF 在土壤中的定殖创造了良好的酸碱环境(pH 6.0 ~ 7.0)。在盐碱地中,联合应用显著降低土壤 pH 和电导率(如紫花苜蓿试验中电导率降低 366.33 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)^[26]。此外,联合应用能显著提升土壤有机碳(SOC)库。生物炭本身是稳定的碳源^[27],而 AMF 分泌球囊霉素进一步稳定碳库^[28-29],两者协同提升土壤碳封存潜力。在微生物群落方面,生物炭为微生物提供“避难所”,而 AMF 菌丝作为“根际延伸”创建了特定的微生物栖息地(菌丝圈),二者协同调控微生物组成与功能。生物炭与 AMF 联合处理提高了其他有益微生物群落的相对丰度,如鞘氨醇单胞菌属(*Sphingobium*)、鞘氨醇杆菌属(*Sphingomonas*)和新鞘氨醇杆菌属(*Novosphingobium*)等^[30],它们与植物根系分泌的有机酸(如 L-苹果酸)相关,进一步改善植物根系的生长环境。

然而,联合改良效应并非总是正向。在极度贫瘠或质地异常的土壤中,高剂量生物炭(>5% w/w)可能导致“过度吸附”效应,不仅固定污染物,也固定了本已有限的有效养分(如硝态氮、速效磷),反而造成植物营养短期胁迫^[31]。此外,某些特定原料(如畜禽粪便)制备的生物炭可能含有较高浓度的重金属、多环芳烃或盐分,其在施入土壤后反而会对土壤微生物群落产生负面影响^[32]。鸡粪生物炭不利于共生形成,降低菌根定植水平和关键共生植物标志基因(如 *SIPT4* 或 *Sl-FatM*)的表达,而小麦秸秆生物炭刺激了共生关系的建立^[33]。

2.2 作物生长与生产力提升

生物炭与 AMF 接种联合应用于作物生产时,可以显著影响作物的生长状况、养分吸收能力及生理特性,提升作物生长与生产力。在生物炭处理基础上接种 AMF,可显著提高玉米(*Zea mays* L.)的磷吸收量与生物量^[5];水稻(*Oryza sativa* L.)研究中,联合处理促进土壤有机磷矿化,增加了水稻地下部磷吸收量,较对照增加了 200%^[34]。在甜椒(*Capsicum frutescens*)中,联合施用使植株叶绿素 a(Chl a)增加了 144%,叶绿素 b(Chl b)增加了 316%,总叶绿素(Chl T)增加了 212%,类胡萝卜素含量增加了 302%^[35];在芦苇(*Phragmites australis*)中,生物炭和 AMF 组合对全株干重生物量的贡献分别比单一生物炭或 AMF 改良组高 32.30% 和 234%^[6];在西洋参(*Panax quin-*

quefolius L.) 中,联合处理不仅提高了 AMF 定殖率,还显著增加了人参皂苷等次生代谢产物的积累^[30]。

虽然,生物炭与 AMF 联合应用在玉米、水稻、甜椒等多种植物上展现出促进养分吸收、增强光合作用及提升生物量与产量的巨大潜力,证实了其跨作物的积极协同效应。但联合应用的促生效果存在显著的“作物-菌种”特异性。研究发现十字花科作物(如油菜、白菜)对 AMF 的依赖性不强^[36-37],因此,联合应用的增产效果可能将远不如对 AMF 高度依赖的茄科、禾本科作物显著。同时,如果使用的 AMF 菌种与作物品种不匹配,联合应用可能表现出中性甚至轻微的抑制效果^[38-39]。此外,在某些情况下,生物炭提供的养分供给可能过于充分,反而降低了植物与 AMF 建立共生,导致菌根定殖率下降^[40]。

2.3 抗逆性与生态修复

生物炭与 AMF 的联合施用显著增强了植物对干旱、盐碱、重金属等逆境的适应能力,并同步提升了污染土壤的生态修复效率^[5, 41]。在干旱胁迫下,生物炭和 AMF 联合处理分别使干旱胁迫下秋葵(*Abelmoschus esculentus*)的株高、地上部干重、根干重提高 31.9%、34.2%、60.0%^[42],增强了植物对水分的利用效率,从而支持植被在退化生境中的恢复。在盐碱胁迫下,玉米秸秆生物炭与 AMF 联合处理使柳枝稷生物量提高 177.3%^[4],促进了盐碱障碍土壤的生物改良和生态功能重建。在重金属污染修复方面,联合修复效果尤为突出。在 200 mg/kg 铅的处理下,联合施用显著促进了百喜草(*Paspalum notatum*)的生长,其株高、根长、生物量较 CK 分别提高了 17.20%、31.70%、608.61%^[7];在镉污染土壤中,联合使用导致酸溶镉(生物有效态)减少 51.99%,可还原镉减少 41.31%^[43],说明联合修复能有效降低镉的活性和迁移风险。

然而,在极端胁迫条件下,联合修复体系可能失效甚至产生生态风险。如前所述,在极高浓度重金属胁迫下(如 2 000 mg/kg 铅),AMF 为了维持自身代谢,可能会主动吸收并转运重金属至植物体内,导致植物地上部重金属含量反常升高,抵

消了生物炭的固定化益处^[7],甚至引发食品安全风险。150 mmol/L 盐碱胁迫时,高剂量炭施加则对植物生长指标的改善起抑制作用,推测高剂量生物炭可能因过度吸附养分或盐离子抑制 AMF 侵染,导致光合效率下降^[44]。此外,生物炭的老化过程可能改变其表面性质,导致其固定的重金属被重新释放,产生“二次污染”风险^[45]。

综上所述,生物炭与 AMF 的联合应用协同提升了土壤-植物系统的健康与功能。在土壤层面,二者通过共建团聚体、调节 pH 与盐分、稳定有机碳库及富集有益微生物群落,显著优化了土壤的物理、化学和生物性质。在植物层面,该联合策略能大幅促进作物对养分的吸收,改善光合生理特性,最终实现生物量与产量的显著提高。尤为重要的是,该联合策略能显著增强植物对干旱、盐碱及重金属污染等逆境的抵御能力。然而,上述所有积极效应均具有边界条件,其成功应用强烈依赖于合理的生物炭剂量与类型选择。在高强度环境胁迫、不匹配的作物-菌种组合或不当的施用条件下,联合效应可能从协同增效减弱为简单叠加,甚至转化为抑制植物生长或带来二次污染风险的拮抗作用。

2.4 生物炭与 AMF 的交互作用

前述章节阐述了生物炭与 AMF 联合在土壤改良、作物增产及抗逆修复中的积极效应与潜在限制。需要强调的是,这些效应在很大程度上源于二者之间存在的显著交互作用,而非其单独效应的简单加和。大量近期的控制试验通过双因素方差分析证实,在植物生长、重金属行为、根际微生物及酶活性等关键指标上,BC × AMF 的显著交互作用具有普遍性^[4, 30, 46-48](见表 1)。

3 生物炭-AMF 促生抗逆机制

生物炭与 AMF 联合使用的协同增效机制,源于二者在物理、化学与生物学层面的多重作用,共同构建了一个微环境调控、微生物互作、植物响应的反应体系(见图 1)。其核心机制可归纳为以下几个方面。

表 1 生物炭与 AMF 交互作用的代表性研究

Tab. 1 Representative studies on the interaction between biochar and AMF

试验对象	胁迫条件	交互显著性	主要交互表现(协同/拮抗)	文献
复羽叶栎	镉胁迫	$p < 0.01$	地上部 Cd 下降 51%,根际 DTPA-Cd 降低 74%	[48]
蓖麻	铬胁迫	$p < 0.05$	叶片鲜重 + 359%,土壤质量指数 + 121%;细菌网络平均度提高	[47]
柳枝稷	NaCl 胁迫	$p < 0.05$	地上部鲜重 + 178%	[4]
西洋参	无胁迫	$p < 0.01$	AMF 定植率 + 53%,定植强度 + 195%	[30]
番茄	无胁迫	$p < 0.05$	提高枝条长度、根长、叶片鲜重和果实干重、氧化酶活	[46]



图 1 生物炭与 AMF 的联合效应机制示意图

Fig. 1 Mechanism of the combined effect of biochar and AMF

3.1 生物炭作为 AMF 定殖与功能的启动平台

生物炭通过多重途径为 AMF 创造了一个更适宜定殖与功能表达的根际微环境,这是其能够增强 AMF 作用的首要机制。

1)物理栖息地与菌丝桥接网络。生物炭高度发达的多孔结构降低了土壤容重并提高了土壤孔隙度^[17],改善了土壤内部的气体交换状况,为 AMF 提供了更有利的生存条件。同时,多孔网状结构为 AMF 菌丝提供了理想的栖息与延伸空间,形成“菌丝-生物炭-土壤”三维连通网络,显著拓

展菌丝在根际之外的延伸范围,增强其对水分与养分的捕获能力。

2)化学环境缓冲与胁迫缓解。生物炭表面碱性官能团(如酚羟基、羧基)通过中和交换性酸(H^+ / Al^{3+})提升土壤 pH 值^[49-50];而低温生产的生物炭呈酸性,适用于碱性土壤、缓冲高 pH^[51]。通过生物炭调节根际 pH,缓解酸性或碱性胁迫,创造了有助于 AMF 菌丝生长和侵染宿主根系的微环境。同时,其高阳离子交换能力(CEC)吸附 $Na^+、Al^{3+}$ 等有害离子,降低土壤电导率^[52],减轻

盐碱与铝毒对菌丝的抑制。

3) 信号富集与碳源启动。生物炭表面可吸附植物根系分泌的独角金内酯等信号分子, 富集于 AMF 孢子周围, 增强了真菌对宿主根系的识别与趋向性^[53]。此外, 生物炭本身可作为有机碳源, 为 AMF 在根际的早期定殖与菌丝萌发提供初始能量底物, 而其表面富集的特定微生物群落可能与 AMF 形成互利的代谢网络, 共同促进菌丝扩展^[54-56]。

综上, 生物炭通过提供物理栖息地、缓冲化学胁迫、富集化学信号这三重作用, 显著优化了 AMF 的生态位, 这是施用生物炭后 AMF 作用得以充分显示的先决条件。

3.2 AMF 与生物炭从物理共存到生物学协同

在生物炭创造的有利基础上, AMF 的生命活动反过来与生物炭形成深度耦合, 将后者从一个静态的改良材料转化为一个动态的、具有生物学活性的功能界面。

球囊霉素-生物炭复合体增强稳定性。AMF 通过分泌球囊霉素, 与生物炭紧密结合, 形成稳定的有机-无机复合体, 有效延缓了生物炭的矿化进程, 显著增强了土壤的碳封存潜力^[57], 更作为高效的“生物胶水”, 与生物炭颗粒、土壤矿物相互缠绕胶结, 促进土壤大团聚体的形成, 提升土壤结构的持久稳定性^[58]。

菌丝驱动吸附、活化、转运养分循环。生物炭的高比表面积可吸附大量磷、钾等养分, 形成“养分库”, AMF 菌丝则延伸并定殖于生物炭孔隙中, 其分泌的有机酸(如柠檬酸、苹果酸)可活化被吸附的磷等养分, 并通过庞大的菌丝网络进行快速运输, 从而形成一个“吸附-解吸-运输”的动态养分循环过程^[59-60]。这解释了为何联合处理能极大提升养分利用率, 其本质是 AMF 赋予了生物炭“缓释”与“定向输送”的生物学功能。

协同构建功能微生物模块。生物炭孔隙选择性富集了如溶磷菌(*Streptomyces*, *Bacillus*, *Pseudomonas*)等功能微生物, 而 AMF 的菌丝网络则作为“根际延伸”, 为这些微生物创建了特定的栖息地(菌丝圈), 并与它们形成互惠互利的代谢网络。例如, 溶磷菌负责矿化难溶性磷, 而 AMF 负责运输, 二者在生物炭界面实现了功能模块的高效组装^[5, 61]。

3.3 微生物网络与酶系统的级联调控机制

生物炭与 AMF 的联合, 进一步通过调控土壤

微生物群落结构和关键酶活性, 放大其协同效应。

驱动微生物互作网络向高复杂度演进。AMF 与植物的共生会诱导根系分泌类黄酮、花生四烯酸等信号物质, 吸引共生微生物定殖^[62-63]。而生物炭与 AMF 联合处理驱动土壤微生物群落的生态演替, 构建更高复杂度、更高功能冗余度的微生物互作网络^[47]。这种稳定的网络结构能够有效缓冲环境胁迫的冲击, 维持生态系统功能的稳定性。

精准调控土壤关键酶活性: 联合处理能特异性激活土壤养分循环和抗逆过程中的关键酶。例如, 碱性磷酸酶、荧光素二乙酸酯水解酶、脱氢酶和过氧化氢酶活性在联合处理中达到峰值^[64]。这些酶的激活, 一方面加速了土壤中有机磷的矿化和有机物的氧化, 释放有效养分, 另一方面, 在逆境下通过加速过氧化物的分解, 有效阻断氧化损伤链, 保护植物细胞。

诱导植物系统性抗逆响应。在胁迫条件下, 联合处理能协同上调植物体内超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶的活性^[65]。生物炭提供的微环境保障与 AMF 诱导的基因表达上调, 共同为酶蛋白合成提供了物质与信号基础, 系统性地增强了植物的抗氧化防御能力。

3.4 生态系统功能优化

生物炭与 AMF 的协同效应, 最终通过一条由碳流驱动的反应链, 系统性地整合并提升了生态系统的养分循环效率和稳定性。其核心机制在于, 二者联合重构了一条从光合碳输入到养分活化、运输、利用的高效路径。

碳流定向与能量启动。AMF 作为巨大的碳汇, AMF 菌丝促进宿主植物将光合碳(如蔗糖)向下分配给地下菌丝网络^[66]。当 AMF 菌丝网络延伸并定殖于生物炭内的微位点, 这一碳流被直接引导至生物炭-菌丝界面, 吸引鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas*)等微生物富集^[30]。这一定向输送行为, 使生物炭颗粒周围成为一个高能量密度的“根际热点”。水稻盆栽试验中, 联合处理使土壤微生物量碳(MBC)提高 39.1%^[34], 正是这一“碳能启动”过程的直接证据。

碳能驱动下的养分网络重构。磷循环增效: 在生物炭界面富集的碳能, 富集了大量功能微生物并激发了它们的代谢活性。富集的溶磷菌等在此高能环境下大量分泌磷酸酶, 加速有机磷的矿化^[34]。与此同时, AMF 菌丝利用其强大的转运能力, 直接介导植物从生物炭微位点中吸收被活

化的磷^[67],从而将“生物炭的吸附固持”“微生物的活化”与“菌丝的直接供”3 个过程串联成一个高效的闭环。氮循环协同:同一碳流也特异性富集并激活了氮循环功能微生物,如固氮菌和氨氧化菌^[68]。生物炭孔隙则通过吸附 NH_4^+ 形成“物理缓释库”,减少氮素淋失,与 AMF 菌丝氮转运功能协同提升氮利用效率 (NUE)^[2]。化学计量平衡调控:生物炭的输入调节了土壤的 C-N-P 化学计量比^[69],而 AMF 驱动的营养循环则与之响应,共同使土壤养分供应更匹配植物需求,从系统层面减少养分损失。

上述碳与养分的高效流动,塑造了一个高复杂度、高连接度的微生物互作网络。该网络具有强大的功能冗余性,能对外部干扰(如干旱、重金属)形成有效缓冲。菌丝分泌物持续微调根际菌群结构,并与生物炭共同维持了 C-N-P 循环关键酶(如磷酸酶、脱氢酶)的长期高活性^[70]。最终,碳能供给、微生物网络、酶活调控三者形成一个正反馈循环,使得生态系统在保持作物高产的同时,也具备了更强的养分保持能力和抗干扰韧性,实现了系统水平的稳定性跃升。

4 结论与展望

生物炭与丛枝菌根真菌 (AMF) 的联合促生在农业可持续发展和生态修复中具有重要意义。二者联合应用构建了一个高效的植物-土壤系统健康调控体系。本研究系统阐明,其协同效应的核心在于:生物炭作为“生态位优化器”,通过提供物理栖息空间、缓冲化学胁迫和富集化学信号,为 AMF 的高效定殖与功能表达创造了先决条件;在此基础上,AMF 与生物炭实现了从物理共存到生物学的功能协同,通过形成球囊霉素-生物炭复合体增强系统稳定性,并通过菌丝驱动吸附、活化、转运的营养循环,将生物炭从静态基质转化为动态功能界面;最终,该联合体系通过驱动高复杂度的微生物互作网络、精准调控土壤与植物关键酶活性,系统性地提升了生态系统的养分循环效率与抗逆能力,从而在土壤改良、作物增产及生态修复中展现出显著的协同增效潜力。

尽管生物炭-AMF 联合技术的应用潜力显著,但其内在的互作机理、长期效应及精准施用策

略仍是当前研究的瓶颈。为推动该技术从“效应验证”迈向可预测、可调控的“精准设计”新阶段,未来研究应聚焦于以下 3 个关键方向。

1) 深化微观界面过程与跨尺度机制解析。未来需突破传统研究方法的局限,综合利用原位微流控技术、高分辨率显微成像(如 SEM、CLSM)与稳定性同位素探测等技术,实时、原位地揭示菌丝在生物炭多孔结构中的定殖动态、延伸策略及其与功能微生物(如溶磷菌、*Sphingomonas*)的互作过程。重点阐明碳、氮、磷等养分在“生物炭-菌丝-根系”这一关键界面上的交换通量与转化路径,从微观尺度上完整揭示协同效应的起源。

2) 加强长期生态安全性与系统稳定性评估。当前研究多关注短期效应,而联合应用的长期效应与潜在风险是决定其大规模应用可行性的关键。必须布局长期田间定位观测与试验,重点评估:生物炭老化过程(如氧化、破碎)对其物理结构、化学性质的改变,及其对 AMF 菌丝网络功能维持的长期影响与抑制阈值;球囊霉素-生物炭复合体在不同环境胁迫下的稳定性及其对土壤有机碳库的长期固存效率;在复杂污染环境下(如复合重金属、持久性有机污染物),联合修复体系的长期有效性及是否存在污染物“二次活化”的潜在风险。

3) 建立精准施用策略并开发智能产品。联合应用的效果存在显著的“生物炭-AMF-作物-环境”情境依赖性。未来研究应致力于:构建基于土壤类型、主要障碍因子(酸化、盐渍化、污染等)和作物需求的精准配伍方案,明确不同来源生物炭(原料、热解温度)与特定 AMF 菌种、作物品种之间的最优组合原则;系统量化在不同胁迫强度下联合应用的效应边界与最佳施用量;推动技术创新,研发如 AMF-生物炭复合功能材料或缓释型颗粒剂等新一代产品,通过材料设计实现养分的智能控释与污染物的靶向固定,提升技术的稳定性、便捷性与普适性。

通过在上述关键科学问题与技术研发上取得的突破,将深刻揭示生物炭-AMF 协同互作的内在规律,精准预测其长期生态效应,并最终建立起高效、安全、可控的精准应用技术体系,为我国乃至全球的农业绿色发展与生态修复实践提供坚实的理论支撑与强大的技术工具。

参考文献

[1] JEYASUBRAMANIAN K, THANGAGIRI B, SAKTHIVEL A, et al. A complete review on biochar: Production, property, multifaceted applications, interaction mechanism and computational approach[J]. *Fuel*, 2021, 292: 120243.

[2] DUAN S L, FENG G, LIMPENS E, et al. Cross-Kingdom nutrient exchange in the plant-arbuscular mycorrhizal fungus-bacterium continuum[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2024, 22(12): 773-790.

[3] GUJRE N, SONI A, RANGAN L, et al. Sustainable improvement of soil health utilizing biochar and arbuscular mycorrhizal fungi: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115549.

[4] WEN Y Q, WU R T, QI D D, et al. The effect of AMF combined with biochar on plant growth and soil quality under saline-alkali stress: Insights from microbial community analysis[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 281: 116592.

[5] MENG L B, CHENG Z Y, WANG Y N, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal interacted with biochar and enhanced phosphate-solubilizing microorganism abundance and phosphorus uptake in maize[J]. *Agronomy*, 2024, 14(8): 1678.

[6] LI S Q, CHI S Q, LIN C Q, et al. Combination of biochar and AMF promotes phosphorus utilization by stimulating rhizosphere microbial co-occurrence networks and lipid metabolites of *Phragmites*[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 845: 157339.

[7] 吴李花, 支小瑞, 原奥, 等. 生物炭-菌根菌联合改变植物对铅胁迫的响应[J]. *环境工程技术学报*, 2025, 15(3): 763-770.

WU L H, ZHI X R, YUAN A, et al. Effects of biochar combined with arbuscular mycorrhizal fungi on plant response to lead stress[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025, 15(3): 763-770.

[8] JOSEPH S, COWIE A L, VAN ZWIETEN L, et al. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar[J]. *GCB Bioenergy*, 2021, 13(11): 1731-1764.

[9] 汤斯奇, 王经臣, JAEHAC K. 不同热解终温和保留时间下污泥生物质炭孔隙结构特征[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(5): 890-898.

TANG S Q, WANG J C, JAEHAC K. Pore structure characteristics of sludge biochars during pyrolysis with various pyrolysis temperatures and holding times[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53(5): 890-898.

[10] 张慧琦, 李子忠, 秦艳. 玉米秸秆生物炭用量对砂土孔隙和持水性的影响[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(6): 1272-1277.

ZHANG H Q, LI Z Z, QIN Y. Effects of corn straw-based biochar amount on pores and water holding capacity of sandy soil [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2022, 31(6): 1272-1277.

[11] 邓筠飞, 杜卫民, 王梦瑶, 等. 基于玉米秸秆合成的多孔生物质炭材料及其电化学储能[J]. *应用化学*, 2019, 36(11): 1323-1332.

DENG J F, DU W M, WANG M Y, et al. Synthesis and the electrochemical energy storage of porous biomass carbon from corn stalk[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 36(11): 1323-1332.

[12] HUANG J, TAN X, ALI I, et al. More effective application of biochar-based immobilization technology in the environment: Understanding the role of biochar[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 872: 162021.

[13] JANU R, MRLIK V, RIBITSCH D, et al. Biochar surface functional groups as affected by biomass feedstock, biochar composition and pyrolysis temperature[J]. *Carbon Resources Conversion*, 2021, 4: 36-46.

[14] BANIK C, LAWWRINENKO M, BAKSHI S, et al. Impact of pyrolysis temperature and feedstock on surface charge and functional group chemistry of biochars[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2018, 47(3): 452-461.

[15] YANG K, JING W, WANG J, et al. Structure-activity mechanism of sodium ion adsorption and release behaviors in biochar[J]. *Agriculture*, 2024, 14(8): 1246.

[16] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1402-1417.

YUANG S, ZHAO L X, MENG H B, et al. The main types of biochar and their properties and expectative researches[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(5): 1402-1417.

[17] GUO J W, ZHOU H, JIA L G, et al. Effects of biochar from different pyrolysis temperatures on soil physical properties and hydraulic characteristics in potato farmland of arid and semi-arid regions[J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 313: 109483.

[18] 樊洪, 谢珊, 龙天雨, 等. 刺梨果渣生物炭对白菜产量及品质和土壤性质的影响[J]. *环境科学*,

- 2024, 45(6): 3543-3552.
- FAN H, XIE S, LONG T Y, et al. Effects of *Rosa roxburghii* pomace biochar on yield and quality of Chinese cabbage and soil properties [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(6): 3543-3552.
- [19] BONFANTE P, GENRE A. Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis [J]. *Nature Communications*, 2010, 1(1): 48.
- [20] SMITH S E, SMITH F A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2011, 62: 227-250.
- [21] AKIYAMA K, MATSUZAKI K I, HAYASHI H. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Nature*, 2005, 435 (7043): 824-827.
- [22] SCHWAB S M, MENGE J A, TINKER P B. Regulation of nutrient transfer between host and fungus in vesicular; Arbuscular mycorrhizas [J]. *New Phytologist*, 1991, 117(3): 387-398.
- [23] PARNISKE M. Arbuscular mycorrhiza: The mother of plant root endosymbioses [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, 6(10): 763-775.
- [24] ZHU X M, LAMBERS H, GUO W J, et al. Extraradical hyphae exhibit more plastic nutrient-acquisition strategies than roots under nitrogen enrichment in ectomycorrhiza-dominated forests [J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(16): 4605-4619.
- [25] PANDIAN K, SUBRAMANIAN P, GNASEKARAN P, et al. Effect of biochar amendment on soil physical, chemical and biological properties and groundnut yield in rainfed Alfisol of semi-arid tropics [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62 (9): 1293-1310.
- [26] 卫玲玲. 丛枝菌根真菌和生物炭对不同盐碱地紫花苜蓿生长和土壤化学性质的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [27] 朱建伟, 刘玉学, 吴超凡, 等. 施用生物炭后土壤有机碳的近红外光谱模型研究与应用 [J]. *生态学报*, 2020, 40(20): 7430-7440.
- ZHU J W, LIU Y X, WU C F, et al. Study on near-infrared spectroscopy model of soil organic carbon after biochar addition and its application [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40: 7430-7440.
- [28] 段旭林, 邢亚娟. 森林演替中球囊霉素功能的研究进展 [J]. *世界生态学*, 2021, 10(3): 423-429.
- DUAN X L, XING Y J. Study on the function of globulin during forest succession: A review [J]. *International Journal of Ecology*, 2021, 10(3): 423-429.
- [29] MILLER R M, JASTROW J D. The role of mycorrhizal fungi in soil conservation [J]. *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture*, 1992: 29-44.
- [30] CHEN X L, RAN Z F, WANG Y, et al. Mechanism allowing biochar to aid in arbuscular mycorrhizal colonization in *Panax quinquefolius* L. roots and improve secondary metabolite production [J]. *Mycorrhiza*, 2025, 35(2): 23.
- [31] BRTNICKY M, DATTA R, HOLATKO J, et al. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148756.
- [32] DEINERT L, HOSSEN S, IKOYI I, et al. Poultry litter biochar soil amendment affects microbial community structures, promotes phosphorus cycling and growth of barley (*Hordeum vulgare*) [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2024, 120: 103591.
- [33] FIGUEIRA-GALÁN D, HEUPEL S, DUELLI G, et al. Exploring the synergistic effects of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on phosphorus acquisition in tomato plants by using gene expression analyses [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 884: 163506.
- [34] 文中华, 陈义轩, 史永佳, 等. 生物炭和丛枝菌根真菌协同促进稻田土壤有机磷向无机磷的转化和水稻磷素吸收 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(6): 1064-1074.
- WEN Z H, CHEN Y X, SHI Y J, et al. Combined application of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi promotes the transformation of organic to inorganic phosphorus in paddy soil and the absorption of phosphorus by rice [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(6): 1064-1074.
- [35] SOUSSANI F E, NILAHYANE A, IKAN C, et al. Enhancing sweet pepper tolerance to combined drought and salinity stresses: Synergistic role of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Journal of Crop Health*, 2025, 77(2): 79.
- [36] COSME M, FERNÁNDEZ I, VAN DER HEIJDEN M G A, et al. Non-mycorrhizal plants: The exceptions that prove the rule [J]. *Trends in Plant Science*, 2018, 23(7): 577-587.
- [37] VEIGA R S L, FACCIO A, GENRE A, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi reduce growth and infect roots of the non-host plant *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2013, 36(11): 1926-1937.
- [38] SUN J H, JIA Q, LI Y, et al. Effects of arbuscular my-

- corrhizal fungi and biochar on growth, nutrient absorption, and physiological properties of maize (*Zea mays* L.)[J]. *Journal of Fungi*, 2022, 8(12): 1275.
- [39] 于士惠, 刘佩勇, 刘云汇, 等. 丛枝菌根真菌-植物-土壤互作网络的生态功能与调控机制研究进展[J]. *环境保护前沿*, 2025, 15(5): 852-861.
- YU S H, LIU P Y, LIU Y H, et al. Research advances in ecological functions and regulatory mechanisms of the arbuscular mycorrhizal fungi-plant-soil interaction network[J]. *Advances in Environmental Protection*, 2025, 15(5): 852-861.
- [40] 史雪荣, 黄宏亮, 季杭翔, 等. 氮和生物炭添加对毛竹林 AMF 侵染率和孢子密度的影响[J]. *林业科学研究*, 2023, 36(4): 165-172.
- SHI X R, HUANG H L, JI H X, et al. Effects of nitrogen and biochar addition on arbuscular mycorrhizal fungi colonization rate and spore density in moso bamboo plantations[J]. *Forest Research*, 2023, 36(4): 165-172.
- [41] FANG X, LEE X Q, TWAGIRAYEZU G, et al. A critical review of the effectiveness of biochar coupled with arbuscular mycorrhizal fungi in soil cadmium immobilization[J]. *Journal of Fungi*, 2024, 10(3): 182.
- [42] JABBOROVA D, ANNAPURNA K, AL-SADI A M, et al. Biochar and arbuscular mycorrhizal fungi mediated enhanced drought tolerance in Okra (*Abelmoschus esculentus*) plant growth, root morphological traits and physiological properties[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, 28(10): 5490-5499.
- [43] LIU L, LI J W, YUE F X, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and biochar amendment on maize growth, cadmium uptake and soil cadmium speciation in Cd-contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2018, 194: 495-503.
- [44] 张雅婷, 楼雪怡, 吴嘉睿, 等. 炭菌联作对盐碱性土性质及甜瓜光合指标的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(6): 352-362.
- ZHANG Y T, LOU X Y, WU J R, et al. Combined effects of humic acid-modified magnetic biochar and AMF on the properties of saline-silka soil and photosynthetic parameters of muskmelon[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(6): 352-362.
- [45] XIANG L, LIU S H, YE S J, et al. Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 420: 126611.
- [46] BIBI S, ULLAH R, BURNI T, et al. Morphophysiological attributes of AMF inoculated tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) ameliorated by resorcinol, biochar and nanobiochar[J]. *Discover Nano*, 2025, 20(1): 122.
- [47] WEN Y Q, WU R T, XU T L, et al. AMF and biochar reshape the bacterial network in rhizosphere soil of *Ricinus communis* under chromium (Cr) stress and improve soil quality[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 492: 138122.
- [48] LIU K, CHEN H Y, ZHANG N L, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar synergistically enhance Cd (II) phytoremediation in *Koeleria bipinnata*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2025, 303: 118882.
- [49] DAI Z M, ZHANG X J, TANG C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification-A critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 581: 601-611.
- [50] 王其选, 陈海宁, 王巍翰, 等. 酸性农田土壤改良材料的选择与应用研究进展[J]. *山东农业科学*, 2024, 56(5): 171-180.
- WANG Q X, CHEN H N, WANG W H, et al. Progress in selection and application of soil improvement materials for acidic farmland[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(5): 171-180.
- [51] HOSSAIN M K, STREZOV V, CHAN K Y, et al. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(1): 223-228.
- [52] YUAN Y F, LIU Q, ZHENG H, et al. Biochar as a sustainable tool for improving the health of salt-affected soils[J]. *Soil & Environmental Health*, 2023, 1(3): 100033.
- [53] SHAHEEN S M, MOSA A, NATASHA, et al. Pros and cons of biochar to soil potentially toxic element mobilization and phytoavailability: Environmental implications[J]. *Earth Systems and Environment*, 2023, 7(1): 321-345.
- [54] WARNOCK D D, LEHMANN J, KUYPER T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300(1): 9-20.
- [55] HILDEBRANDT U, OUZIAD F, MARNER F J, et al. The bacterium *Paenibacillus validus* stimulates growth of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* up to the formation of fertile spores[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2006, 254(2): 258-267.

[56] KOTHAMASI D, KOTHAMASI S, BHATTACHARYYA A, et al. Arbuscular mycorrhizae and phosphate solubilising bacteria of the rhizosphere of the mangrove ecosystem of Great Nicobar Island, India[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 42(4): 358-361.

[57] 王琦,王丽萍,尹宁宁,等. AMF 接种的复垦土壤中有有机碳形成的研究现状与发展[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(8): 220-226.

WANG Q, WANG L P, YIN N N, et al. Research states and development of organic carbon formation in AMF inoculated reclaimed soil [J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46 (8): 220-226.

[58] 张佳佳,曾立雄,雷蕾,等. 丛枝菌根途径的土壤有机碳固存机制研究进展[J]. *生态学报*, 2024, 44(12): 4945-4955.

ZHANG J J, ZENG L X, LEI L, et al. Research progress of soil organic carbon sequestration mechanism by arbuscular mycorrhizal pathway[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12): 4945-4955.

[59] JAVEED H M R, ALI M, ZAMIR M S I, et al. Biochar and arbuscular mycorrhizae fungi to improve soil organic matter and fertility[M]//*Sustainable Agriculture Reviews* 61. Cham: Springer International Publishing, 2023: 331-354.

[60] AHMED N, DENG L F, WANG C, et al. Advancements in biochar modification for enhanced phosphorus utilization in agriculture[J]. *Land*, 2024, 13(5): 644.

[61] JABBOROVA D, ANNAPURNA K, CHOUDHARY R, et al. Interactive impact of biochar and arbuscular mycorrhizal on root morphology, physiological properties of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) and soil enzymatic activities[J]. *Agronomy*, 2021, 11(11): 2341.

[62] VIERHEILIG H, BAGO B, ALBRECHT C, et al. Flavonoids and arbuscular-mycorrhizal fungi [M]//*Flavonoids in the Living System*. Boston, MA: Springer US, 1998: 9-33.

[63] XU Y J, CHEN Z, LI X Y, et al. Mycorrhizal fungi alter root exudation to cultivate a beneficial microbiome for plant growth[J]. *Functional Ecology*, 2023, 37(3): 664-675.

[64] JABBOROVA D, SINGH P K, SAHARAN B S, et al. Biochar and AMF improve growth, physiological traits, nutrients of turmeric and soil biochemical properties in drought stress[J]. *Agricultural Research*, 2024, 13(4): 802-813.

[65] PENG X, MA J Y, ZHANG J C, et al. Biochar promotes the growth of arbuscular mycorrhizal fungi on taxodium 'Zhongshanshan' in coastal saline-alkali soils [J]. *Forests*, 2025, 16(5): 828.

[66] HUANG H, LIU S J, DU Y, et al. Carbon allocation mediated by arbuscular mycorrhizal fungi alters the soil microbial community under various phosphorus levels [J]. *Fungal Ecology*, 2023, 62: 101227.

[67] HAMMER E C, BALOGH-BRUNSTAD Z, JAKOBSEN I, et al. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 77: 252-260.

[68] GOU X M, HU Y X, NI H Q, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate erosional soil nitrogen loss by regulating nitrogen cycling genes and enzymes in experimental agro-ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906: 167425.

[69] YAN B J, ZHANG Y P, WANG Y Z, et al. Biochar amendments combined with organic fertilizer improve maize productivity and mitigate nutrient loss by regulating the C-N-P stoichiometry of soil, microbiome, and enzymes[J]. *Chemosphere*, 2023, 324: 138293.

[70] XU Y J, CHEN Z, LI X Y, et al. The mechanism of promoting rhizosphere nutrient turnover for arbuscular mycorrhizal fungi attributes to recruited functional bacterial assembly [J]. *Molecular Ecology*, 2023, 32(9): 2335-2350.

(编辑 张欢)

作者简介



徐云剑,云南大学生态与环境学院副教授,云南省“兴滇英才”青年人才,中国生态学学会青年托举人才(2023—2025),主要从事植物-微生物互作机制研究。先后主持国家自然科学基金项目2项,国家重点研发计划子课题、云南省“兴滇英才”专项等项目7项。以第一或通讯作者在*Global Change Biology*、*Functional Ecology*、*Molecular Ecology*等国际权威学术期刊发表学术论文20余篇,参与撰写学术专著2部。