作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2026, 52(5): 1536−1547 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.53082

生物炭配施化肥提高玉米‖大豆下玉米产量和土壤生态系统多功能性

郭星宇 胡 丹 林苏期 王梦凯 谭文峰 黄传琴*

农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室 / 华中农业大学资源与环境学院, 湖北武汉 430070

摘 要: 为明确玉米‖大豆中施用生物炭对玉米生长和土壤生态系统多功能性的影响, 本研究于 2023—2024 年连续 2 年在湖北省咸宁市开展田间试验, 探究不同种植模式(玉米单作(MM)、玉米‖大豆(SM))和不同施肥模式(常规化肥(CF)、生物炭+化肥(BF))对玉米生长、土壤理化性质、微生物多样性和土壤生态系统多功能性的影响。结果表明, 就种植模式而言, 与玉米单作相比, 玉米‖大豆 0~30 cm 土层玉米根长密度显著增加 21.58%~32.24%, 10~20 cm 土壤容重显著降低 6.31%, 同时 0~10 cm 和 20~30 cm 土壤有机碳含量分别显著增加 3.51%和 13.01%, 10~20 cm 和 20~30 cm 土壤全氮分别显著增加 8.96%和 12.13%; 就施肥处理而言, 与常规化肥相比, 施用生物炭 0~30 cm 根长密度显著增加 5.84%~11.42%, 10~20 cm 容重显著降低 4.77%, 同时 0~10 cm 和 20~30 cm 土壤有机碳含量分别显著增加 4.54%和 14.11%; 二者互作可进一步强化间作效益, 与玉米单作+常规化肥(MM-CF)相比, 玉米‖大豆+化肥(SM-CF)下玉米当量产量显著增加 33.56%, 0~30 cm 土层土壤生态系统多功能性指数显著提高 101.63%~119.91%, 玉米‖大豆+生物炭+化肥(SM-BF)下玉米当量产量则显著增加 49.24%, 0~30 cm 土层土壤生态系统多功能性指数显著提高 134.59%~238.63%。随机森林模型表明, 根系生物量是影响土壤生态系统多功能性指数的最关键因素, 表明生物炭配施化肥可以通过促进玉米‖大豆下玉米根系生长来改善土壤结构, 促进养分积累, 并增强微生物多样性, 从而协同提高玉米产量与土壤生态系统功能, 推动农业可持续发展。

关键词: 间作; 生物炭; 产量; 根系形态; 土壤生态系统多功能性

Biochar combined with chemical fertilizer increases maize yield and soil ecosystem multifunctionality in an intercropped maize-soybean

Guo Xing-Yu, Hu Dan, Lin Su-Qi, Wang Meng-Kai, Tan Wen-Feng, and Huang Chuan-Qin*

Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs / College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China

Abstract: To investigate the effects of biochar addition on maize growth and soil ecosystem multifunctionality in a maize–soybean intercropping system, a two-year field experiment was conducted in Xianning City, Hubei Province, from 2023 to 2024. The study examined two planting patterns—monoculture maize (MM) and intercropped maize and soybean (SM)—and two fertilization regimes—conventional chemical fertilizer (CF) and biochar combined with chemical fertilizer (BF). Parameters assessed included maize growth, soil physicochemical properties, microbial diversity, and ecosystem multifunctionality. In terms of cropping system, compared with monoculture maize, intercropping significantly increased maize root length density in the 0–30 cm soil layer by 21.58%–32.24%, reduced soil bulk density by 6.31% in the 10–20 cm layer, increased soil organic carbon content by 3.51% and 13.01% in the 0–10 cm and 20–30 cm layers, respectively, and raised total nitrogen content by 8.96% and 12.13% in the 10–20 cm and 20–30 cm layers, respectively. In terms of fertilizer treatment, compared with conventional chemical fertilizer, the combination of biochar and chemical fertilizer increased maize root length density by 5.84%–11.42% in the 0–30 cm layer, reduced soil bulk density by 4.77% in the 10–20 cm layer, and increased soil organic carbon content by 4.54% and 14.11%

本研究由国家重点研发计划项目(2021YFD1901205)和湖北省重大科技专项(2023BBA003, 2025BBA003)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1901205) and the Major Science and Technology Project of Hubei Province (2023BBA003, 2025BBA003).

* 通信作者(Corresponding author): 黄传琴, E-mail: hcq@mail.hzau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: guoxy@webmail.hzau.edu.cn

Received (收稿日期): 2025-10-27; Accepted (接受日期): 2026-01-22; Published online (网络出版日期): 2026-02-03.

URL: https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20260202.1932.004

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

in the 0–10 cm and 20–30 cm layers, respectively. Relative to MM-CF, intercropping with chemical fertilizer (SM-CF) increased maize equivalent yield by 33.56%, and enhanced the soil ecosystem multifunctionality index by 101.63%–119.91% in the 0–30 cm layer. Intercropping with biochar and chemical fertilizer (SM-BF) further increased equivalent yield by 49.24% and boosted the multifunctionality index by 134.59%–238.63%. A random forest model identified root biomass as the most influential factor affecting soil ecosystem multifunctionality. These findings suggest that biochar combined with chemical fertilizer improves soil structure, enhances nutrient accumulation, and increases microbial diversity by promoting maize root growth under intercropped conditions, thereby synergistically enhancing both maize yield and soil ecosystem functions, and contributing to sustainable agricultural development.

Keywords: intercropping; biochar; yield; root morphology; soil ecosystem multifunctionality

间作是指在同一田块上种植 2 种或多种作物, 其在发挥作物地上部生产力及资源空间互补方面具有明显优势[1]。其中禾本科与豆科作物间作增加作物产量和提高资源利用效率的效果已经受到广泛研究[2-4]。Li 等[5]研究表明, 与单作相比, 间作系统可以增产(1.5±0.1) t hm^{-2}, 其中与玉米具有显著时间生态位分化的系统产量增益最大。Zhao 等[6]研究表明, 豆科作物可以增强玉米在间作系统中的氮素吸收和利用效率, 从而有效提高作物产量。禾本科与豆科作物间作的产量优势主要归因于地上部与根系的高效互作。根系作为植物与土壤连接的枢纽, 是植物吸收土壤养分和水分的主要器官, 同时对地上部的生长发育起支持作用[7]。禾本科作物主根较长、纤细且细根发达, 而豆科作物主根较短、粗壮且细根较少, 种间互作可以优化作物根系空间分布, 达到重塑土壤结构的目的[8-9]。近年来, 国家明确号召要大力推广轮作、间作和套作, 以推进农业结构调整, 实现农田种地养地结合[10]。玉米‖大豆是结合 C_3 和 C_4 作物种类的传统高产间作系统, 明确玉米‖大豆中根系形态特征变化与作物产量形成之间的关系, 对推动我国玉米产能提升具有重要意义。

作为一种土壤改良剂, 生物炭是生物质材料在高温厌氧条件下产生的具有高芳香度和多孔结构的有机物, 含有丰富的常量和微量营养素[11-13]。施用生物炭可以调节作物根系形态, 增强根系对土壤养分的吸收能力[14]。然而, 目前的研究多集中于生物炭添加对单作系统作物生长和产量的影响上, 关于玉米‖大豆中生物炭添加对作物产量和土壤质量的影响有待进一步探究。

长江流域是我国重要的粮食生产基地, 但其长期集约化的单一种植模式导致土壤结构破坏、农田生产力日趋下降, 严重制约了该区域农业的可持续发展[15]。在这一背景下, 如何实现有限资源的高效利用成为亟待解决的生产问题。玉米‖大豆作为一种典型的禾豆复合种植模式, 能够通过资源互补与生物学增效, 在提高作物产量的同时改善土壤肥力, 是实现“用地”与“养地”结合的重要途径[16]。当前长江流域间作模式研究存在明显不足, 主要表现为禾豆间作的培肥增产效应尚未充分发挥, 间作对土壤生态系统多功能性的影响机制研究较少。因此, 本研究以三大主粮作物之一的玉米为研究对象, 设置玉米单作和玉米‖大豆 2 种种植模式、常规化肥和生物炭+化肥 2 种施肥模式组合种植试验, 重点解析以下问题: (1) 施加生物炭是否有助于提升玉米‖大豆中玉米产量和土地利用效率; (2) 玉米‖大豆与生物炭的联合效应是否能够改善田间生态环境, 从而协同提高土壤生态系统多功能性。本研究结果有助于进一步揭示玉米‖大豆模式的增产机制, 为该模式在长江流域的推广应用提供实践经验。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

田间试验于 2023—2024 年在湖北省咸宁市双溪桥镇(114.49°E, 29.95°N)进行。该地区属亚热带大陆性季风气候, 多年平均气温为 16.9°C, 多年平均降水量为 1508 mm。供试土壤机械组成为黏粒 30.4%、粉粒 51.7%、沙粒 17.9%, 土壤质地属于壤质黏土。试验前 0~20 cm 土层土壤理化性质为容重 1.56 g cm^{-3}、孔隙度 41.28%、酸碱度(pH) 5.41、有机质 26.2 g kg^{-1}、全氮 1.35 g kg^{-1}、全磷 0.42 g kg^{-1}、全钾 8.70 g kg^{-1}。试验所用玉米秸秆生物炭由 500~600℃下限氧热解 1 h 制备而成, 其基本性质为 pH 7.93、总碳含量 51.09%、总氮含量 0.85%、总磷含量 0.23%、总钾含量 1.58%、碳氮比为 60.11。

1.2　试验设计

试验采用双因素随机区组设计, 每个处理重复 3 次, 小区面积为 105 m^2 (21 m × 5 m)。试验的主处理为种植模式, 分别为玉米单作(maize monoculture, MM)和玉米‖大豆(intercropped maize and soybean, MS); 副处理为施肥模式, 分别为常规化肥(chemical

fertilizer, CF)和生物炭+化肥(biochar+chemical fertilizer, BF)。常规化肥处理为氮肥 150 kg hm^{-2} (尿素, 含 N 46%, 纯量折算为 69 kg hm^{-2}), 生物炭+化肥处理为玉米秸秆生物炭 10,000 kg hm^{-2}+氮肥 105 kg hm^{-2} (减氮 30%, 纯量折算为 64.2 kg hm^{-2})。除氮肥外, 各处理均为过磷酸钙 90 kg hm^{-2} (含 P_2O_5 12%, 纯量折算为 10.8 kg hm^{-2})和氯化钾 90 kg hm^{-2} (含 K_2O 60%, 纯量折算为 54 kg hm^{-2}), 肥料均作为基肥一次性施入。供试玉米品种为郑单 958, 供试大豆品种为中黄 13 号。玉米单作行距与株距均为 40 cm, 玉米单作种植密度为 57,100 株 hm^{-2}。间作种植采用“2 行玉米, 2 行大豆”模式, 其中玉米间作行距 40 cm、株距 40 cm, 大豆间作行距 20 cm、株距 40 cm, 玉米大豆行间距 30 cm, 玉米间作种植密度为 42,900 株 hm^{-2}。玉米与大豆均于每年 5 月中旬播种, 9 月中旬收获, 收获后秸秆全部还田。各处理冬季均种植冬油菜, 其他田间管理措施与当地农户保持一致。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 作物产量与生物量 在作物收获期, 每个小区随机选取长势均一的 6 个样区, 取样面积为 0.72 m^2, 人工脱粒后称重计算玉米实际产量, 并同步在田间调查玉米产量构成要素, 包括穗数、穗粒数和千粒重。基于单作玉米与间作玉米产量计算玉米产量偏土地当量比(partial land equivalent ratio, $PLER_M$), 计算公式如下:

$$PLER_M = IM_i/M_i \quad (1)$$

式中, IM_i 和 IM_i 分别为间作玉米和单作玉米的产量, 玉米产量偏土地当量比> 0.5, 表明玉米间作具有优势; 玉米产量偏土地当量比< 0.5, 表明玉米间作不具有优势[17]。

每个小区随机选取长势一致的 3 株玉米植株, 采集地上部秸秆装入网纱袋中; 同时以植株为中心利用直径 11 cm 的根钻分层采集 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层根系样品, 将其装入 100 目尼龙网中用去离子水冲洗, 使用镊子小心挑去杂质和杂根后, 依据气味和颜色来区分玉米与大豆根系。将玉米地上部植株和根系于 105℃烘箱杀青 30 min, 60℃烘干称重以计算干物质重量, 利用元素分析仪测定植株地上部和根系碳含量, 并计算玉米干物质量偏土地当量比(biomass partial land equivalent ratio, LER_B)和玉米碳吸收量偏土地当量比(carbon partial land equivalent ratio, LER_C), 计算公式如下:

$$LER_B = IBM_i/BM_i \quad (2)$$

式中, IBM_i 和 BM_i 分别为间作玉米和单作玉米的干物质重量, 玉米干物质量偏土地当量比> 1, 表明间作玉米具有优势;

$$LER_C = ICM_i/CM_i \quad (3)$$

式中, ICM_i 和 CM_i 分别为间作玉米和单作玉米的碳吸收量, 玉米碳吸收量偏土地当量比> 1, 表明间作玉米具有优势。

1.3.2 作物根系特征 将采集的根系样品使用 WinRHIZOF 程序进行根系图像扫描, 获得根长、根表面积和根体积等参数。将根长、根表面积和根体积分别除以土壤体积, 计算出各土层的根长密度、根表面积密度和根体积密度[18]。

1.3.3 土壤性质 在作物收获后每个小区随机选取 3 个 50 cm × 50 cm × 30 cm 的取样坑, 分别于 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层的中心位置利用环刀(环刀体积为 100 cm^3)采集土壤样品, 用烘干法测定土壤容重, 并计算土壤孔隙度, 计算公式如下:

$$\text{土壤容重(g cm}^{-3}) = (\text{土壤干重} - \text{环刀重}) / \text{环刀体积} \quad (4)$$

$$\text{土壤孔隙度(\%)} = (1 - \text{容重}/2.65) \times 100\% \quad (5)$$

在作物收获后每个小区按“S”形取样法采集 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层土壤样品, 将所得土壤样品混匀后装入无菌密封袋, 使用冰盒保存。土壤样品分成 2 份, 一份进行风干处理, 另一份保存于–80℃ 冰箱, 用于土壤微生物分析。风干土壤样品磨细过 0.149 mm 筛, 用于土壤有机碳和全氮含量的测定。使用重铬酸钾氧化法测定[19]土壤有机碳含量, 使用凯氏定氮法测定[19]土壤全氮含量。保存于–80℃冰箱的土壤样品用于 DNA 提取, 由上海派森诺生物科技股份有限公司进行高通量测序(Illumina NovaSeq)。使用 OMEGA Soil DNA Kit (D5635-02) (Omega Bio-Tek, Norcross, GA, 美国)试剂盒提取土壤样品总 DNA。再用带有 barcode 的特异引物扩增 16S rDNA 的 V3~V4 区。扩增引物序列为: 正向引物 338F (5′-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3′)和反向引物 806R (5′-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3′)。使用 Illumina 公司的 TruSeq Nano DNA LT Library Prep Kit 进行建库, 在 Illumina NovaSeq 机器上完成 16S rDNA 扩增子双末端测序工作。使用 fastq (0.19.6)软件对双端原始测序序列进行质控, 使用 FLASH 软件对双端原始测序序列进行拼接, 使用 UPARSE v7.1 软件对质控拼接后的有效序列进行操作分类单元 ASV (amplicon sequence variants)聚类,

利用 RDP classifier 比对 silva_132 基因数据库进行物种分类学注释[20]。

1.3.4 土壤生态系统多功能性指数　选取 14 个与作物生长和土壤微环境密切相关的常用生态功能指标, 其中作物生长指标包括地上部生物量、根系生物量、地上部碳含量、根系碳含量、根长密度、根表面积密度和根体积密度; 土壤微环境指标包括土壤容重、土壤孔隙度、土壤有机碳、土壤全氮和土壤细菌群落 Pielous、Shannon 和 Simpson 指数多样性指数。土壤生态系统多功能性指数计算公式为:

$$\text{土壤容重}' = -\text{土壤容重} \tag{6}$$

$$Z_i = \left(X_i - \bar{X}\right) / S_i \tag{7}$$

$$\text{土壤生态系统多功能性指数} = \sum Z_i / n \tag{8}$$

式中, 土壤容重′为负效应值, 需进行转换, X_i 为 i 指标的实测值, $\bar{X}$ 为 i 指标的平均值, S_i 为 i 指标的标准差, Z_i 为 i 指标的 Z 分数, n 为指标数量 14。

1.4 数据统计分析

本试验使用 Excel 2016 进行数据处理, 使用 Origin Pro 2024 作图及回归分析, 使用 SPSS 22.0 软件进行双因素方差分析, 采用 Duncan 法($LSD_{0.05}$)进行多重比较, 利用 R 语言中的 randomForest 包进行变量重要性分析, 使用 rfPermute 包进行置换检验($P < 0.05$)评估变量重要性的统计学意义。除产量和微生物数据外, 图与表中的数据均为 2023—2024 年平均值。

2 结果与分析

2.1 不同农田管理措施对玉米产量与偏土地当量比的影响

方差分析表明, 种植模式、施肥模式及其互作均显著影响玉米产量与产量构成因素(表 1), 对于种植模式而言, 与 MM 处理相比, 2023 年 SM 处理显著增加玉米当量产量 13.34%, 主要表现为穗粒数显著增加 16.55% ($P < 0.01$); 2024 年 SM 处理显著增加玉米当量产量 21.54%, 主要表现为每株穗数和穗粒数分别显著增加 9.19%和 22.22% ($P < 0.05$)。对于施肥处理而言, 与 CF 处理相比, 2023 年 BF 处理显著增加玉米穗粒数 4.08% ($P < 0.05$); 2024 年 BF 处理显著增加玉米当量产量 20.71%, 主要表现为每株穗数显著增加 22.22% ($P < 0.05$)。种植模式与施肥模式的交互作用未对 2023 年玉米当量产量与产量构成因素产生显著影响; 2024 年交互作用则对玉米当量

表 1　2023–2024 年玉米当量产量与偏土地当量比

Table 1　Maize equivalent yield and partial land equivalent ratio (PLER) in 2023–2024

年份 Year	种植模式 Cropping system	施肥模式 Fertilizer treatment	当量产量 Equivalent yield ($kg\ hm^{-2}$)	每株穗数 Ear number per plant (pod number per plant)	穗粒数 Grains per ear (pod^{-1})	千粒重 1000-grain weight (g)	玉米产量偏土地当量比 $PLER_M$
2023	MM	CF	8443±983 b	1.0±0.01 a	352±14 b	211±12.1 a	-
		BF	8563±901 b	1.0±0.01 a	381±17 b	228±10.7 a	-
	SM	CF	9551±1105 a	1.0±0.01 a	426±13 a	232±11.4 a	0.57±0.01 a
		BF	9723±1046 a	1.0±0.01 a	429±11 a	229±10.2 a	0.57±0.01 a
	种植模式 C		**	ns	**	ns	
	施肥模式 F		ns	ns	*	ns	
	C×F		ns	ns	ns	ns	
2024	MM	CF	8504±1283 c	2.0±0.01 c	525±17 b	174±17.2 b	-
		BF	11,283±1294 b	2.5±0.01 b	547±16 b	193±15.4 a	-
	SM	CF	11,357±555 b	2.5±0.01 b	606±23 a	200±12.8 a	0.68±0.04 a
		BF	12,691±1370 a	3.0±0.08 a	564±28 b	192±10.5 a	0.57±0.03 b
	种植模式 C		**	**	*	ns	-
	施肥模式 F		*	**	*	ns	-
	C×F		**	*	ns	*	-

MM: 玉米单作; SM: 玉米‖大豆; CF: 常规化肥; BF: 生物炭+化肥; C: 种植模式; F: 施肥模式。不同小写字母代表不同处理间达到显著差异($P < 0.05$)。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: 无显著差异。

MM: monoculture maize; SM: intercropped maize and soybean; CF: chemical fertilizer; BF: biochar + chemical fertilizer; C: cropping system; F: fertilizer treatment. $PlER_M$: partial land equivalent ratio. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$); *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: no significant difference.

产量产生显著影响, 与 MM-CF 相比, MM-BF、SM-CF 和 SM-BF 当量产量分别显著提高 32.68%、33.56%和 49.24%, 主要表现为每株穗数分别显著增加 25.00%、25.00%、50.00%, 千粒重分别显著增加 10.46%、14.45%、9.94% ($P < 0.05$)。试验开展 2 年后, CF 和 BF 处理中玉米产量偏土地当量比分别为 0.68 和 0.57, 表明玉米‖大豆在 2 种施肥模式下均有利于提高土地利用效率。

2.2 不同农田管理措施对玉米地上部与根系生长的影响

2.2.1 玉米干物质积累 种植模式与施肥模式对玉米作物生长与养分吸收均产生显著影响(图 1)。对于种植模式而言, 与 MM 处理相比, SM 处理有利于增加茎秆与根系生物量, 同时提高叶片与根系碳吸收量; 对于施肥处理而言, 与 CF 处理相比, BF 处理有利于增加根系生物量, 同时提高叶片与根系碳吸收量; 种植模式与施肥模式的交互作用则对玉米生物量积累与根系碳吸收产生显著影响。试验开展 2 年后, CF 和 BF 处理中地上部和根系干物质量偏土地当量比分别为 1.16、1.00 和 1.00、1.11, 表明间作有利于作物生长(图 2-A); CF 和 BF 处理中地上部和根系碳吸收量偏土地当量比分别为 1.13、1.03 和 1.00、1.05, 表明间作可以促进作物养分吸收(图 2-B)。与 CF 处理相比, BF 处理中地上部干物质量偏土地当量与碳吸收量偏土地当量比分别显著降低 14.18%和 11.84%, 而根系干物质量偏土地当量与碳吸收量偏土地当量比则显著提高 11.72%和 5.51% ($P < 0.05$)。以上结果表明, 在玉米‖大豆中, 与常规施肥相比, 施用生物炭可以将更多的光合产物和碳资源分配给根系, 促进玉米根系生物量积累, 提升玉米根系养分吸收能力。

2.2.2 根长密度 方差分析表明, 种植模式、施肥模式及其互作均显著影响玉米根长密度(图 3-A)。对于种植模式而言, 与 MM 处理相比, SM 处理中 0~30 cm 的根长密度显著增加 21.58%~32.24% ($P < 0.01$); 对于施肥处理而言, 与 CF 处理相比, BF 处理中 0~30 cm 的根长密度显著增加 5.84%~11.42% ($P < 0.01$); 种植模式与施肥模式的交互作用显著影响 0~30 cm 根长密度, 与 MM-CF 相比, MM-BF 中仅 0~10 cm 的根长密度显著增加 11.03%, 而 SM-CF 和 SM-BF 中 0~30 cm 的根长密度分别显著增加 14.35%~31.81%和 27.74%~47.25% ($P < 0.05$)。以上结果表明, 玉米‖大豆促进玉米根系下扎延伸, 而施用生物炭进一步强化了间作对玉米根系生长的促进效应。

2.2.3 根表面积密度 方差分析表明, 种植模式、施肥模式及其互作均显著影响玉米根表面积密度(图 3-B)。对于种植模式而言, 与 MM 处理相比,

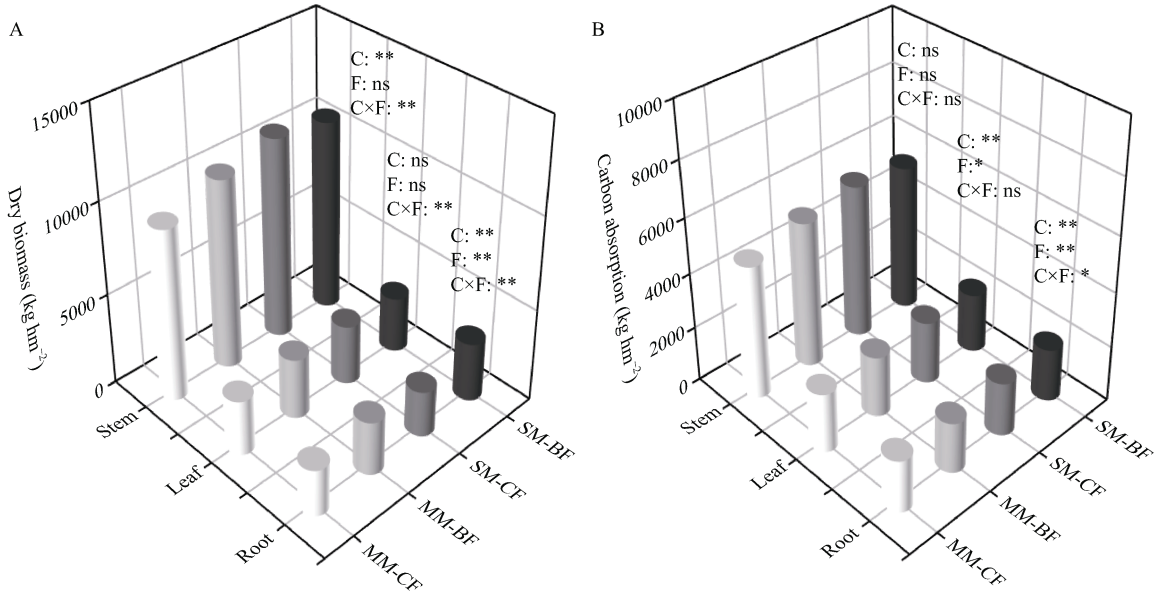

图 1 2023–2024 年玉米地上部和根系生物量(A)与地上部和根系碳含量(B)

Fig. 1 Maize aboveground and root biomass (A) and aboveground and root carbon content (B) in 2023–2024

MM: 玉米单作; SM: 玉米‖大豆; CF: 常规化肥; BF: 生物炭+化肥; C: 种植模式; F: 施肥模式。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: 无显著差异。

MM: monoculture maize; SM: intercropped maize and soybean; CF: chemical fertilizer; BF: biochar + chemical fertilizer; C: cropping system; F: fertilizer treatment. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: no significant difference.

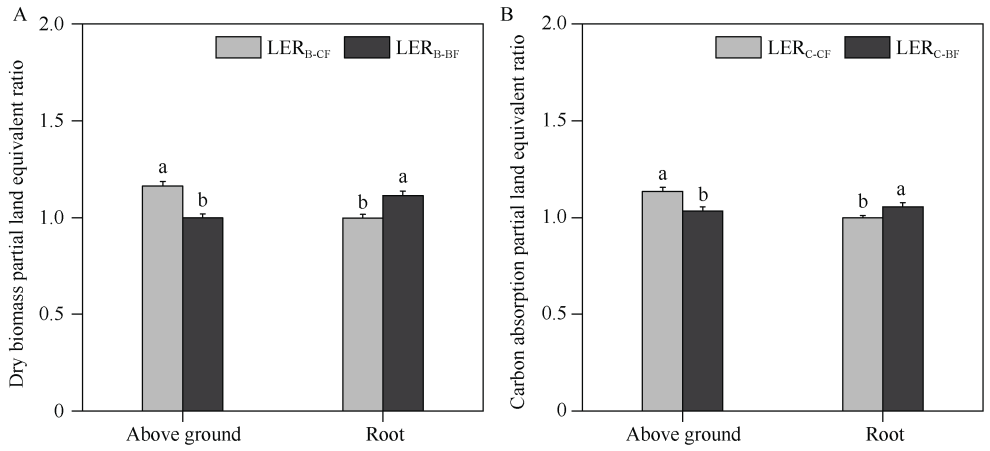

图 2　2023–2024 年玉米干物质量偏土地当量比(A)与碳吸收量偏土地当量比(B)

Fig. 2　Dry biomass partial land equivalent ratio (A) and carbon absorption partial land equivalent ratio (B) in 2023–2024

LER_{B-CF}: 常规化肥玉米干物质量偏土地当量比; LER_{B-BF}: 生物炭+化肥玉米干物质量偏土地当量比; LER_{C-CF}: 常规化肥玉米碳吸收量偏土地当量比; LER_{C-BF}: 生物炭+化肥玉米碳吸收量偏土地当量比。不同小写字母代表不同处理间达到显著差异($P < 0.05$)。

LER_{B-CF}: biomass partial land equivalent ratio with chemical fertilizer; LER_{B-BF}: biomass partial land equivalent ratio with biochar + chemical fertilizer; LER_{C-CF}: carbon partial land equivalent ratio with chemical fertilizer; LER_{C-BF}: carbon partial land equivalent ratio with biochar + chemical fertilizer. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

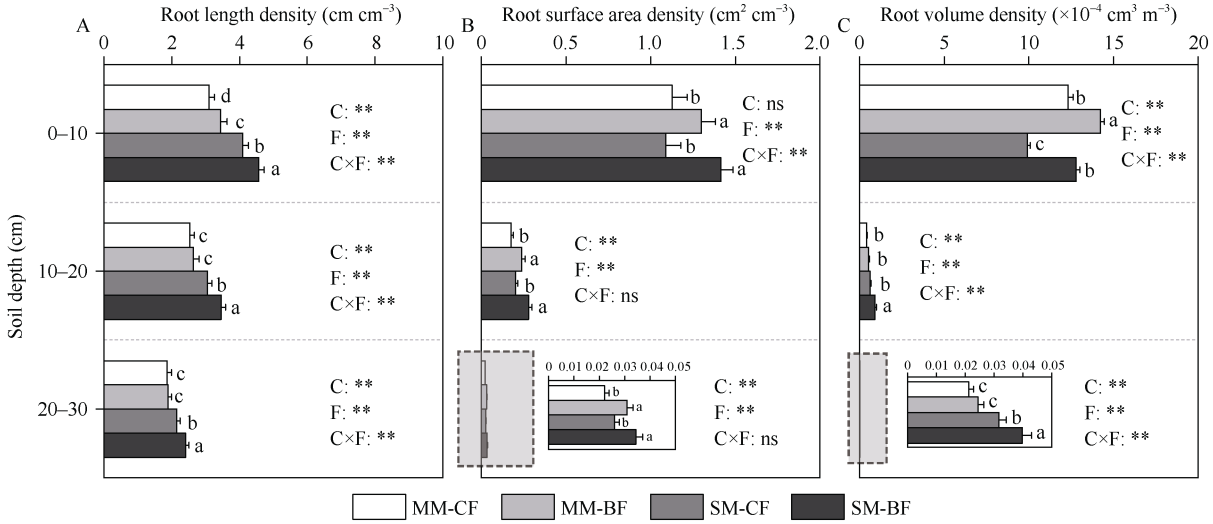

图 3　2023–2024 年玉米收获期 0–30 cm 土层根长密度(A)、根表面积密度(B)和根体积密度(C)

Fig. 3　Root length density (A), root surface density (B), and root volume density (C) of the 0–30 cm soil layer after maize harvest in 2023–2024

MM: 玉米单作; SM: 玉米‖大豆; CF: 常规化肥; BF: 生物炭+化肥; C: 种植模式; F: 施肥模式。不同小写字母代表不同处理间达到显著差异($P < 0.05$)。**: $P < 0.01$; ns: 无显著差异。

MM: monoculture maize; SM: intercropped maize and soybean; CF: chemical fertilizer; BF: biochar + chemical fertilizer; C: cropping system; F: fertilizer treatment. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$); **: $P < 0.01$; ns: no significant difference.

SM 处理中 10~20 cm 和 20~30 cm 的根表面积密度分别显著增加 15.83%和 13.71% ($P < 0.01$); 对于施肥处理而言, 与 CF 处理相比, BF 处理中 0~30 cm 根表面积密度显著增加 22.46%~38.10% ($P < 0.01$); 种植模式与施肥模式的交互作用仅显著影响 0~10 cm 根表面积密度, 与 MM-CF 相比, MM-BF 和 SM-BF 中 0~10 cm 根表面积密度分别显著增加 15.37%和 25.54% ($P < 0.05$), SM-CF 与 MM-CF 中则未有显著差异。以上结果表明, 施用生物炭有效增加玉米根表面积密度, 尤其是在玉米‖大豆下, 二者互作显著增强了表层根系与土壤的接触界面。

2.2.4　根体积密度　　方差分析表明, 种植模式、施肥模式及其互作均显著影响玉米根体积密度(图 3- C)。对于种植模式而言, 与 MM 处理相比, SM 处理中 10~20 cm 和 20~30 cm 根体积密度显著增加 60.53%和 56.62% ($P < 0.01$); 对于施肥处理而言, 与 CF 处理

相比, BF 处理中 0~30 cm 根体积密度显著增加 21.39%~38.26% ($P < 0.01$); 种植模式与施肥模式的交互作用显著影响 0~30 cm 根体积密度, 其中 MM-BF 较 MM-CF 中显著增加 0~10 cm 根体积密度 15.37%, SM-CF 较 MM-CF 中显著增加 20~30 cm 根体积密度 49.34%, SM-BF 较 MM-CF 中则显著增加 10~20 cm 和 20~30 cm 根体积密度 117.15%和 87.75% ($P < 0.05$)。以上结果表明, 玉米‖大豆促进玉米根系垂直分布, 施用生物炭则进一步优化了深层玉米根体积扩展。综上, 玉米‖大豆与施用生物炭对玉米根系形态均存在不同程度的影响, 其中二者交互作用能够有效刺激玉米根系生长, 最大程度地扩大根系与土壤的接触界面, 有利于玉米构建庞大的根系网络。

2.3 不同农田管理措施对土壤微环境的影响

2.3.1 土壤容重和孔隙度 不同处理下土壤容重均随土层加深呈现增加趋势, 土壤孔隙度则随土层加深呈现降低趋势(表 2)。方差分析表明, 种植模式、施肥模式及其互作均显著影响土壤容重与孔隙度, 对于种植模式而言, 与 MM 处理相比, SM 处理中 10~20 cm 容重显著降低 6.31%, 10~20 cm 孔隙度显著增加 9.66% ($P < 0.01$); 对于施肥处理而言, 与 CF 处理相比, BF 处理中 10~20 cm 容重显著降低 4.77%, 10~20 cm 孔隙度显著增加 7.15% ($P < 0.01$); 种植模式与施肥模式的交互作用显著影响 10~30 cm 容重与孔隙度, 其中 MM-BF 较 MM-CF 中 20~30 cm 容重显著降低 2.77%, SM-CF 较 MM-CF 中 20~30 cm 容重显著降低 4.09%; SM-BF 则较 MM-CF 中 10~20 cm 容重显著降低 11.05%, 同时 10~20 cm 孔隙度显著增加 16.90% ($P < 0.05$)。以上结果表明, 玉米‖大豆和施用生物炭均能有效改善土壤物理结构, 二者互作对降低土壤容重, 增加孔隙度的效果最为突出, 尤其是在 10~20 cm 土层发挥了最佳的协同改良作用。

2.3.2 土壤有机碳和全氮 不同处理下土壤有机碳和全氮含量均随土层加深呈现下降趋势(表 2)。方差分析表明, 种植模式、施肥模式及其互作均显著影响土壤有机碳与全氮含量, 对于种植模式而言, 与 MM 处理相比, SM 处理中 0~10 cm 和 20~30 cm 有机碳含量显著增加 3.51%和 13.01%, 10~20 cm 和 20~30 cm 全氮含量显著增加 8.96%和 12.13% ($P < 0.01$); 对于施肥处理而言, 与 CF 处理相比, BF 处理中 0~10 cm 和 20~30 cm 有机碳含量显著增加 4.54%和 14.11%, 0~10 cm 和 10~20 cm 全氮含量显著增加 2.12%和 4.20% ($P < 0.01$); 种植模式与施肥模式的交互作用显著影响 0~30 cm 有机碳含量与 10~30 cm 全氮含量, 其中 MM-BF 较 MM-CF 中 20~30 cm 有机碳含量显著增加 5.98%, SM-CF 较 MM-CF 中 20~30 cm 有机碳含量显著增加 4.92%, 同时 10~20 cm 和 20~30 cm 全氮含量显著增加 2.62%和 8.56%, SM-BF 较 MM-CF 中 0~30 cm 有机碳含量显著增加 2.60%~ 27.86%, 同时 10~20 cm 和 20~30 cm 全氮含量显著增加 13.13%和 13.45% ($P < 0.05$)。以上结果表明, 施用生物炭可以有效提升土壤有机碳和全氮含量, 尤其是在玉米‖大豆下, 二者互作可以使土壤养分在耕层内分布更为均匀和高效。

表 2 2023–2024 年玉米收获期 0–30 cm 土层土壤容重、孔隙度、有机碳和全氮

Table 2 Soil bulk density, soil porosity, soil organic carbon, and soil total nitrogen in the 0–30 cm soil layer after maize harvest in 2023–2024

指标 Indicator	土层 Soil depth (cm)	MM		SM		种植模式 C	施肥模式 F	C×F
		CF	BF	CF	BF			
土壤容重 Soil bulk density ($g\ cm^{-3}$)	0–10	1.36±0.01 a	1.32±0.02 b	1.35±0.02 a	1.33±0.03 b	ns	ns	ns
	10–20	1.55±0.02 a	1.55±0.03 a	1.52±0.01 a	1.38±0.01 b	**	**	**
	20–30	1.66±0.01 a	1.61±0.01 b	1.59±0.01 b	1.66±0.02 a	ns	ns	*
	平均 Mean	1.52±0.01 a	1.49±0.02 b	1.49±0.02 b	1.45±0.02 c	*	ns	ns
土壤孔隙度 Soil porosity (%)	0–10	46.96±0.47 a	48.57±0.49 a	47.24±0.37 a	48.11±0.48 a	ns	ns	ns
	10–20	39.53±0.40 b	39.53±0.30 b	40.49±0.31 b	46.21±0.45 a	**	**	**
	20–30	35.25±0.35 a	37.04±0.37 a	37.89±0.38 a	35.18±0.34 a	ns	ns	**
	平均 Mean	40.58±0.34 a	41.71±0.41 a	41.88±0.42 a	43.16±0.43 a	*	*	ns
土壤有机碳 Soil organic carbon ($g\ kg^{-1}$)	0–10	13.43±0.13 b	13.69±0.14 b	13.55±0.14 b	14.51±0.15 a	**	**	*
	10–20	13.57±0.14 b	13.41±0.13 b	13.28±0.13 b	13.92±0.12 a	ns	ns	*
	20–30	10.06±0.10 c	10.66±0.11 b	10.56±0.12 b	12.86±0.13 a	**	**	**
	平均 Mean	12.35±0.12 b	12.59±0.13 b	12.46±0.11 b	13.77±0.13 a	**	*	**

(续表 2)

指标 Indicator	土层 Soil depth (cm)	MM		SM		种植模式 C	施肥模式 F	C×F
		CF	BF	CF	BF			
土壤全氮 Soil total nitrogen ($g\,kg^{-1}$)	0–10	2.18±0.03 a	2.14±0.02 b	2.10±0.01 b	2.23±0.04 a	**	ns	ns
	10–20	1.89±0.04 c	1.86±0.02 c	1.94±0.05 b	2.14±0.04 a	**	**	**
	20–30	1.69±0.01 b	1.66±0.01 b	1.84±0.03 a	1.92±0.03 a	**	ns	**
	平均 Mean	1.92±0.02 b	1.89±0.01 b	1.96±0.02 b	2.10±0.01 a	**	*	**

MM: 玉米单作; SM: 玉米‖大豆; CF: 常规化肥; BF: 生物炭+化肥; C: 种植模式; F: 施肥模式。不同小写字母代表不同处理间达到显著差异($P < 0.05$)。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: 无显著差异。

MM: monoculture maize; SM: intercropped maize and soybean; CF: chemical fertilizer; BF: biochar + chemical fertilizer; C: cropping system; F: fertilizer treatment. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$); *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: no significant difference.

2.3.3　土壤细菌群落　　方差分析表明, 种植模式显著影响土壤细菌群落的 Pielous 和 Shannon 指数(图 4), 与 MM 处理相比, SM 处理中 0~30 cm 土层细菌群落的 Pielous 和 Shannon 指数分别显著提高 0.59%和 1.05% ($P < 0.05$); 施肥模式则未对土壤细菌群落 Pielous、Shannon 和 Simpson 指数产生显著影响; 种植模式与施肥模式交互作用显著影响细菌群落 Pielous 和 Shannon 指数, 其中 MM-BF、SM-CF 和 SM-BF 较 MM-CF 处理中 0~30 cm 土层细菌群落的 Pielous 指数分别显著提高 0.47%、1.15%和 0.50%, Shannon 指数分别显著提高 0.49%、1.44%和 1.16% ($P < 0.05$)。

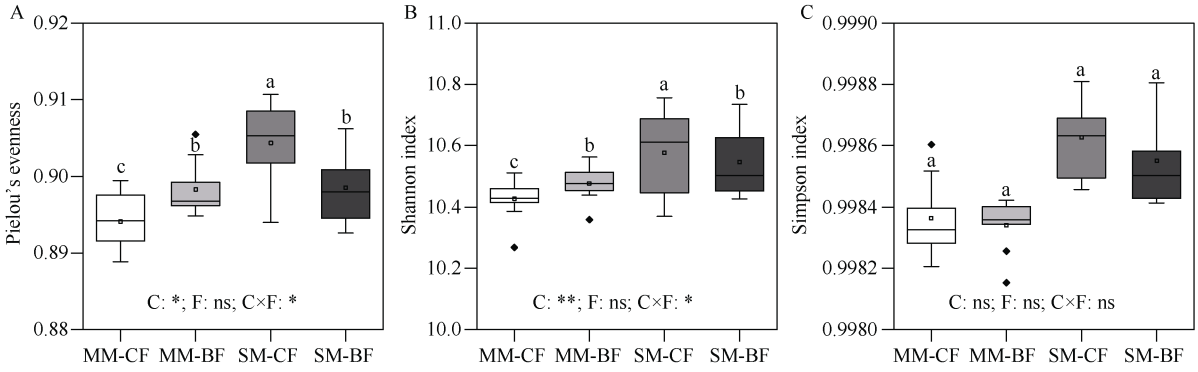

图 4　2024 年玉米收获期 0–30 cm 土层土壤细菌群落 Pielous (A)、Shannon (B)和 Simpson (C)指数

Fig. 4　Pielous (A), Shannon (B), and Simpson (C) indices of soil bacteria communities in the 0–30 cm soil layer after maize harvest in 2024

MM: 玉米单作; SM: 玉米‖大豆; CF: 常规化肥; BF: 生物炭+化肥; C: 种植模式; F: 施肥模式。不同小写字母代表不同处理间达到显著差异($P < 0.05$)。$n = 9$; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: 无显著差异。

MM: monoculture maize; SM: intercropped maize and soybean; CF: chemical fertilizer; BF: biochar + chemical fertilizer; C: cropping system; F: fertilizer treatment. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$); $n = 9$; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: no significant difference.

2.4　不同农田管理措施对土壤生态系统的多功能性指数的影响

试验开展 2 年后, 0~30 cm 土层土壤生态系统多功能性指数整体表现为 MM-CF < MM-BF < SM-CF < SM-BF (图 5)。与 MM-CF 相比, MM-BF、SM-CF 和 SM-BF 中 0~30 cm 土层土壤生态系统多功能性指数分别显著提高 41.46%~118.63%、101.63%~119.91%和 134.59%~238.63% ($P < 0.05$)。随机森林分析结果表明, 玉米根系生物量是生态系统多功能性的主要驱动力, 这说明了根系在维持生态系统功能方面的关键作用(图 6)。一方面, 玉米‖大豆下根系互作有利于发挥不同作物在养分利用上的互补优势, 提高土地利用效率; 另一方面, 施用生物炭进一步扩大了间作对土壤微环境改善的优势, 二者协同作用可以为作物生长奠定良好的土壤环境, 进而促进玉米产量和生态系统多功能性提升。

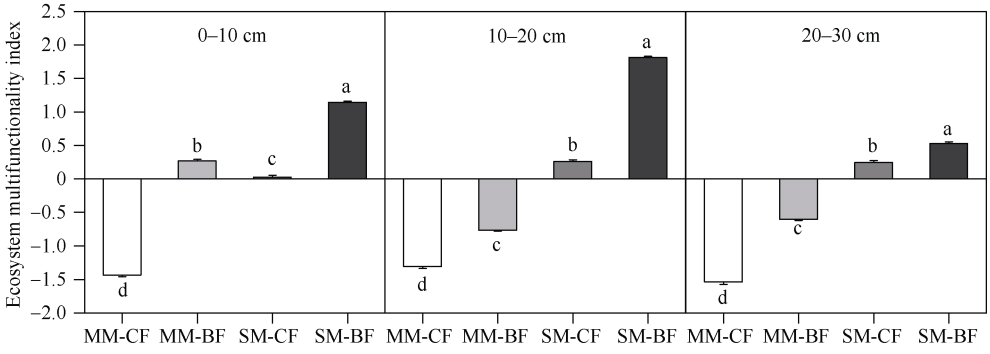

图 5 玉米收获期 0–30 cm 土层土壤生态系统多功能性指数

Fig. 5 Soil ecosystem multifunctionality index in the 0–30 cm soil layer after maize harvest

MM: 玉米单作; SM: 玉米‖大豆; CF: 常规化肥; BF: 生物炭+化肥。不同小写字母代表不同处理间达到显著差异($P < 0.05$)。

MM: monoculture maize; SM: intercropped maize and soybean; CF: chemical fertilizer; BF: biochar + chemical fertilizer. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

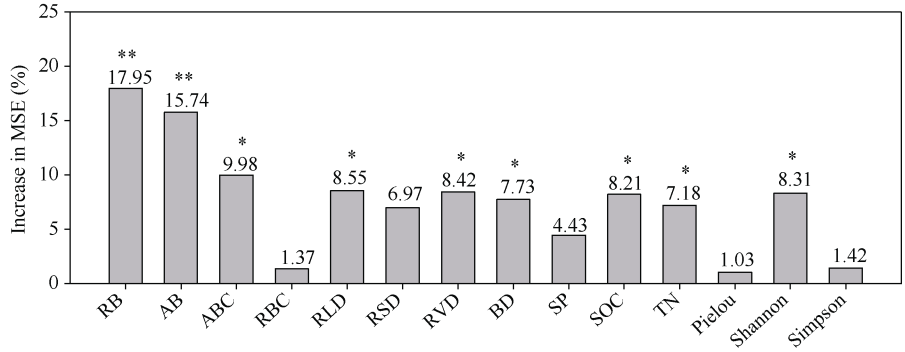

图 6 玉米收获期 0–30 cm 土层土壤生态系统多功能性指数的随机森林预测分析

Fig. 6 Random forest prediction analysis of soil ecosystem multifunctionality index in the 0–30 cm soil layer after maize harvest

RB: 根系生物量; AB: 地上部生物量; ABC: 地上部碳吸收量; RBC: 根系碳吸收量; RLD: 根长密度; RSD: 根表面积密度; RVD: 根体积密度; BD: 土壤容重; SP: 土壤孔隙度; SOC: 土壤有机碳; TN: 土壤全氮。均方误差(MSE)表示预测变量的重要性, 其值越大, 表明该变量越重要; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$。

RB: root biomass; AB: aboveground biomass; ABC: aboveground carbon content; RBC: root carbon content; RLD: root length density; RSD: root surface area density; RVD: root volume density; BD: soil bulk density; SP: soil porosity; SOC: soil organic carbon; TN: soil total nitrogen. Mean square error (MSE) indicates the importance of each predictor variable; higher MSE values reflect greater importance. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

3 讨论

3.1 玉米‖大豆有利于促进玉米根系生长与产量提升

间作下作物根系之间的互补性和竞争性对于提高资源利用效率至关重要。本试验研究结果表明, 同一施肥模式下, 与单作玉米相比, 间作玉米收获期的根长密度、根表面积密度和根体积密度均显著增加(图 3)。在玉米‖大豆中, 玉米根系生长发育会受到种间和种内地下竞争的影响, 因此为了更有效地寻找资源, 通常会调整根系形态以适应自然界中生态位的竞争并实现资源利用的最大化[21-22]。间作玉米根系可塑性的增强有利于其优先探索养分利用率较高的土壤区域, 减少与大豆对养分资源的竞争, 加强玉米在间作中的优势地位[23-24]。本研究发现, 玉米‖大豆有利于降低土壤容重, 增加土壤孔隙度, 提高土壤有机碳和全氮含量(表 2), 这可能是间作下作物根系互作的结果[25]。禾本科植物根系在地下部竞争中强于豆科, 更强的种间竞争力表现在玉米根系可塑性的增强, 这有利于打破长期旋耕形成的土壤犁底层, 降低土壤容重, 优化土壤结构[26]。同时, 玉米与具有固氮特性的豆科作物间作时存在氮素互补效应, 可以促进有机质矿化, 从而释放出更多有效养分。然而, 玉米‖大豆对土壤细菌群落多样性影响不大(图 4)。这是因为土壤微生物群落的稳定是一个缓慢的过程, 短期研究不足以驱动土壤细菌群落发生巨变, 可能需要更长期(多年甚至数十年)的玉米‖大豆, 才能使细菌群落多样性产生统计学上的显著差异[27]。本研究中, 与玉米单作相比, 玉米‖

大豆可以显著提高玉米产量, 其偏土地当量比均大于 0.5 (表 1)。这表明间作有利于提高土地利用效率, 更具有产量优势。在玉米‖大豆中, 玉米产量的提升主要归因于穗数的增加。与单作玉米相比, 玉米和大豆地上部植株的空间互补性有利于玉米捕获更多的光线, 促进光合产物的形成及其向籽粒的运输[28]。

3.2　生物炭进一步扩大玉米‖大豆对土壤微环境改善的优势

生物炭是一种富含碳的土壤改良剂, 具有改良土壤结构和促进生产的潜力[29]。本试验研究结果表明, 与常规施肥相比, 施用生物炭进一步提高玉米‖大豆土壤有机碳和全氮含量(表 2)。生物炭作为富含多种营养元素的芳香族碳材料, 其本身即是持久的土壤有机碳库[30]。在以豆科植物为基础的间作中, 不同植物根系互作会加剧土壤中氮的消耗, 施用生物炭可以吸附土壤中的 NH_3 和 N_2O, 延长了氮素在根际的滞留时间, 有利于促进作物氮素利用, 并减少土壤氮盈余, 在提高土壤肥力方面具有巨大潜力[31]。然而, 本研究中, 相较于常规施肥处理, 生物炭和氮肥联合施用会降低玉米‖大豆土壤细菌多样性(图 4), 这与林少颖等[32]研究结果不一致。这可能是因为生物炭虽然具有提供氮素的能力, 却没有足够的封存能力将其提供的大量氮素留在土壤中供微生物使用[33]。本研究发现, 在玉米‖大豆中, 生物炭处理下玉米根系干物质偏土地当量比与碳吸收偏土地当量比高于常规化肥处理(图 2)。一方面, 生物质炭丰富的孔隙结构为玉米根系提供了优越的附着点与生长空间, 有利于玉米根系的生长与扩展, 从而增加间作玉米根系碳吸收[34-35]。另一方面, 施用生物炭可以增加土壤碳氮比, 有利于豆科植物生物固氮和利用菌根真菌菌丝网络将氮转移到禾本科植物中, 二者协同作用可以产生累积效应进一步促进间作玉米根系生长[36-37]。生物炭对禾本科与豆科植物间作中菌丝网络介导的氮转移机制相当复杂, 未来需要更多的研究来量化生物炭对氮转移的影响。

本研究中, 施用生物炭能够进一步增强玉米‖大豆下玉米根系生长(图 3), 其主要原因一是间作中豆科作物可以利用根瘤菌固氮作用向土壤释放活性氮, 同时其根系分泌物可以激活玉米根系的 AMT1 氮转运蛋白基因表达, 有利于提升玉米根系对土壤氮素的吸收效率[38]。二是生物炭作为潜在调节剂, 其表面含氧官能团与 NH_4^+的配位作用可以形成稳定复合体, 使作物根际氮素缓释周期延长, 促使玉米充分发挥氮素吸收和利用优势, 从而在产量提升的基础上实现节氮增效[39]。随机森林分析结果表明, 玉米根系生物量是生态系统多功能性的主要驱动力, 这说明了根系在维持生态系统功能方面的关键作用(图 6)。一方面, 玉米‖大豆下根系互作有利于发挥不同作物在养分利用上的互补优势, 提高土地利用效率; 另一方面, 施用生物炭进一步扩大了间作对土壤微环境改善的优势, 二者协同作用可以为作物生长奠定良好的土壤环境, 进而促进玉米产量和生态系统多功能性提升[40]。

4　结论

玉米‖大豆可以改善玉米根长、根体积和根表面积等根系形态指标, 增强玉米根系可塑性; 同时, 地下部根系高效互作有利于降低土壤容重, 促进有机碳积累。生物炭配施化肥进一步扩大了间作根系互作对土壤微环境改善的优势, 二者互作可以产生累积效应扩大以豆科植物为基础的间作模式的优势。综上所述, 在玉米‖大豆下施用生物炭可以提高玉米产量, 增强土壤生态系统多功能性, 促进农业生产可持续发展。

References

[1] 张佳运, 马淑梅, 余常兵, 等. 长江流域旱地多熟模式水分供需平衡特征与水分生产效益. 作物学报, 2022, 48: 2891–2907.
Zhang J Y, Ma S M, Yu C B, et al. Characteristics of water supply-demand equilibrium and water production benefits of the dryland multiple cropping patterns in the Yangtze River basin. Acta Agron Sin, 2022, 48: 2891–2907 (in Chinese with English abstract).

[2] 邓超, 李永梅, 范茂攀, 等. 大豆单间作对土壤团聚体及固土能力的影响. 水土保持研究, 2020, 27(2): 77–83.
Deng C, Li Y M, Fan M P, et al. Effects of different planting patterns of soybean on soil aggregates and soil consolidation ability. Res Soil Water Conserv, 2020, 27(2): 77–83 (in Chinese with English abstract).

[3] 杨文亭, 王晓维, 王建武. 豆科-禾本科间作系统中作物和土壤氮素相关研究进展. 生态学杂志, 2013, 32: 2480–2484.
Yang W T, Wang X W, Wang J W. Crop-and soil nitrogen in legume-gramineae intercropping system: research progress. Chin J Ecol, 2013, 32: 2480–2484 (in Chinese with English abstract).

[4] Ren Y Y, Wang X L, Zhang S Q, et al. Influence of spatial arrangement in maize-soybean intercropping on root growth and water use efficiency. Plant Soil, 2017, 415: 131–144.

[5] Li C J, Hoffland E, Kuyper T W, et al. Syndromes of production in intercropping impact yield gains. Nat Plants, 2020, 6: 653–660.

[6] Zhao Z X, Li Z Y, Li Y, et al. Supplementary irrigation and

reduced nitrogen application improve the productivity, water and nitrogen use efficiency of maize-soybean intercropping system in the semi-humid drought-prone region of China. Agric Water Manag, 2024, 305: 109126.

[7] 任俊波, 杨雪丽, 陈平, 等. 种间距离对玉米-大豆带状套作土壤理化性状及根系空间分布的影响. 中国农业科学, 2022, 55: 1903–1916.
Ren J B, Yang X L, Chen P, et al. Effects of interspecific distances on soil physicochemical properties and root spatial distribution of maize-soybean relay strip intercropping system. Sci Agric Sin, 2022, 55: 1903–1916 (in Chinese with English abstract).

[8] 张辰煜, 葛军勇, 褚俊聪, 等. 燕麦红芸豆带状间作的产量效应及根系形态与土壤酶活性. 作物学报, 2025, 51: 459–469.
Zhang C Y, Ge J Y, Chu J C, et al. Yield effect and its root and soil enzyme characteristics of oat and red kidney bean strip intercropping. Acta Agron Sin, 2025, 51: 459–469 (in Chinese with English abstract).

[9] 李玉英, 胡汉升, 程序, 等. 种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响. 生态学报, 2011, 31: 1617–1630.
Li Y Y, Hu H S, Cheng X, et al. Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above-and below-growth in faba bean/mazie intercropping system. Acta Ecol Sin, 2011, 31: 1617–1630 (in Chinese with English abstract).

[10] 祝晓慧, 谭婧琳, 周慧颖, 等. 不同基因型大豆与玉米间作对土壤磷组分与作物磷吸收的影响. 应用生态学报, 2024, 35: 1583–1589.
Zhu X H, Tan J L, Zhou H Y, et al. Effects of different genotypes soybean and maize intercropping on soil phosphorus fractions and crop phosphorus uptake. Chin J Appl Ecol, 2024, 35: 1583–1589 (in Chinese with English abstract).

[11] 殷明, 高玉红, 徐鹏, 等. 生物炭对不同种植模式下土壤肥力及胡麻产量和品质的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33: 1563–1573.
Yin M, Gao Y H, Xu P, et al. Effects of biochar on soil fertility and the yield and quality of oil flax under different cropping patterns. Chin J Eco-Agric, 2025, 33: 1563–1573 (in Chinese with English abstract).

[12] 姜珊, 张仲胜, 李敏, 等. 短期生物炭添加对退化盐碱湿地土壤微生物群落结构特征影响. 土壤与作物, 2023, 12(2): 225–233.
Jiang S, Zhang Z S, Li M, et al. Effect of short-term biochar addition on soil microbial community structure in degraded saline-alkali wetland. Soil Crop, 2023, 12(2): 225–233 (in Chinese with English abstract).

[13] 王世红, 姚鸿文, 郜昌建, 等. 生物质炭介导微生物对马尾松和杉木根系氮磷利用效率的影响. 植物营养与肥料学报, 2025, 31: 1420–1431.
Wang S H, Yao H W, Gao C J, et al. Effects of biochar via microbial communities on nitrogen and phosphorus use efficiency in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata*. J Plant Nutr Fert, 2025, 31: 1420–1431 (in Chinese with English abstract).

[14] Xiang Y Z, Deng Q, Duan H L, et al. Effects of biochar application on root traits: a meta-analysis. GCB Bioenergy, 2017, 9: 1563–1572.

[15] 郑国强, 江南, 于兴修. 长江下游沿线土地利用区域结构演化分析. 自然资源学报, 2003, 18: 568–574.
Zheng G Q, Jiang N, Yu X X. Analysis of the evolved structure of land use in the Lower Yangtze River basin. J Nat Resour, 2003, 18: 568–574 (in Chinese with English abstract).

[16] 刘小明, 雍太文, 苏本营, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作系统中作物产量的影响. 作物学报, 2014, 40: 1629–1638.
Liu X M, Yong T W, Su B Y, et al. Effect of reduced N application on crop yield in maize-soybean intercropping system. Acta Agron Sin, 2014, 40: 1629–1638 (in Chinese with English abstract).

[17] Ma H M, Yu X Q, Yu Q, et al. Maize/alfalfa intercropping enhances yield and phosphorus acquisition. Field Crops Res, 2023, 303: 109136.

[18] Reinhardt D R, Miller R M. Size classes of root diameter and mycorrhizal fungal colonization in two temperate grassland communities. New Phytol, 1990, 116: 129–136.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析(第 3 版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis, 3rd edn. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).

[20] Xu N, Tan G C, Wang H Y, et al. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. Eur J Soil Biol, 2016, 74: 1–8.

[21] 王艳, 米国华, 张福锁. 氮对不同基因型玉米根系形态变化的影响研究. 中国生态农业学报, 2003, 11: 69–71.
Wang Y, Mi G H, Zhang F S. Effect of nitrate levels on dynamic changes of root morphology in different maize inbred lines. Chin J Eco-Agric, 2003, 11: 69–71 (in Chinese with English abstract).

[22] Li H T, Fan Z L, Wang G C, et al. Root plasticity of maize intercropped with a legume green manure contributes to the maintenance of grain yield under reduced nitrogen inputs. Field Crops Res, 2025, 334: 110151.

[23] 覃潇敏, 潘浩男, 肖靖秀, 等. 不同磷水平下玉米-大豆间作系统根系形态变化. 应用生态学报, 2021, 32: 3223–3230.
Qin X M, Pan H N, Xiao J X, et al. Root morphological changes in maize and soybean intercropping system under different phosphorus levels. Chin J Appl Ecol, 2021, 32: 3223–3230 (in Chinese with English abstract).

[24] Jing B, Shi W J, Chen T, et al. Optimizing root distribution and water use efficiency in maize/soybean intercropping under different irrigation levels: the role of underground interactions. Soil Tillage Res, 2025, 249: 106490.

[25] Zhang J, Hu B J, Zheng Y R, et al. Long term intercropping promotes improvement of soil quality and alleviates faba bean wilt disease. Agric Ecosyst Environ, 2025, 381: 109443.

[26] Liu S K, Dong A H, Niu B, et al. Maize/cover crop intercropping mitigates soil erosion and enhances yield of ridge cultivation in Chinese Mollisol region. Catena, 2025, 255: 109012.

[27] Peng Y M, Xu H S, Shi J, et al. Soil microbial composition, diversity, and network stability in intercropping versus monoculture responded differently to drought. Agric Ecosyst Environ, 2024, 365: 108915.

[28] Wang M J, Shi W, Kamran M, et al. Effects of intercropping and regulated deficit irrigation on the yield, water and land resource utilization, and economic benefits of forage maize in arid region of Northwest China. Agric Water Manag, 2024, 298: 108876.

[29] Liu X Z, Manevski K, Liu F L, et al. Biomass accumulation and

water use efficiency of faba bean-ryegrass intercropping system on sandy soil amended with biochar under reduced irrigation regimes. Agric Water Manag, 2022, 273: 107905.

[30] 李毅, 冯浩, 梁嘉平, 等. 土壤属性和作物生长对生物炭施用的响应和反馈研究进展. 水土保持学报, 2022, 36(5): 9–16.
Li Y, Feng H, Liang J P, et al. Research advances of responses and feedback of soil properties and crop growth to biochar application. J Soil Water Conserv, 2022, 36(5): 9–16 (in Chinese with English abstract).

[31] Harpole W S, Biederman L A. On the importance of accurate reporting: a response to comments on 'Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis'. GCB Bioenergy, 2014, 6: 172–175.

[32] 林少颖, 曾瑜, 陈金梅, 等. 施用秸秆和生物炭的茉莉园土壤微生物量及细菌多样性的差异. 环境科学学报, 2023, 43: 383–395.
Lin S Y, Zeng Y, Chen J M, et al. Differences in soil microbial biomass and bacterial diversity under straw and biochar amendments in Jasminum sambac garden. Acta Sci Circumstantiae, 2023, 43: 383–395 (in Chinese with English abstract).

[33] Sun J L, Li H B, Wang Y N, et al. Biochar and nitrogen fertilizer promote rice yield by altering soil enzyme activity and microbial community structure. GCB Bioenergy, 2022, 14: 1266–1280.

[34] Xiu L Q, Zhang W M, Wu D, et al. Biochar can improve biological nitrogen fixation by altering the root growth strategy of soybean in Albic soil. Sci Total Environ, 2021, 773: 144564.

[35] 何家帅, 李新美, 魏跃鹏, 等. 长期深耕秸秆还田配施生物炭对砂姜黑土团聚体及小麦-玉米产量的影响. 农业工程学报, 2024, 40(7): 161–171.
He J S, Li X M, Wei Y P, et al. Effects of long-term deep tillage and straw return with biochar addition to lime concretion black soil on the aggregates and wheat-maize yield. Trans CSAE, 2024, 40(7): 161–171 (in Chinese with English abstract).

[36] Hou S, Sun X R, Chen G H, et al. Biochar addition mitigates asymmetric competition of water and increases yield advantages of maize-alfalfa strip intercropping systems in a semiarid region on the Loess Plateau. Field Crops Res, 2024, 319: 109645.

[37] Liu L, Wang Y F, Yan X W, et al. Biochar amendments increase the yield advantage of legume-based intercropping systems over monoculture. Agric Ecosyst Environ, 2017, 237: 16–23.

[38] Begam A, Pramanick M, Dutta S, et al. Inter-cropping patterns and nutrient management effects on maize growth, yield and quality. Field Crops Res, 2024, 310: 109363.

[39] 邵娟, 南运有, 李越, 等. 减量施氮下玉米间作鲜食豌豆水分利用特征对施用生物炭的响应. 灌溉排水学报, 2025, 44(10): 67–77.
Shao J, Nan Y Y, Li Y, et al. Effect of biochar application and reduced nitrogen fertilization on water use of maize-garden pea intercropping system. J Irrig Drain, 2025, 44(10): 67–77 (in Chinese with English abstract).

[40] Mueller C W, Baumert V, Carminati A, et al. From rhizosphere to detritusphere: soil structure formation driven by plant roots and the interactions with soil biota. Soil Biol Biochem, 2024, 193: 109396.