

张枫叶, 李可, 贺群岭, 等. 有机肥配施生物炭对土壤肥力和花生产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(1): 59-67.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.01.007

有机肥配施生物炭对土壤肥力和花生产量的影响

张枫叶, 李可, 贺群岭, 陈雷, 张梦圆, 吴继华, 杨明达, 刘艺玮, 邹露阳
(商丘市农林科学院, 河南 商丘 476000)

摘要: 本研究旨在明确有机肥配施生物炭对河南省东部花生主产区土壤肥力及花生产量、品质的作用效果, 为改善该区域花生种植土壤环境、构建科学环保的施肥体系提供理论依据。试验于河南省商丘市民权县进行, 以高油高产花生品种商花 21 号为供试材料, 采用随机区组设计进行大田试验, 共设置 6 个处理, 以常规施肥为对照 (CK)、常规施肥+有机肥 (Y1) 处理, 常规施肥+有机肥+4 个不同生物炭用量 (2.5 t/hm²、3.0 t/hm²、3.5 t/hm²、4.0 t/hm², Y2~Y5) 处理, 试验连续 2 年。在花生成熟期采集 0~20 cm 土层土壤样品, 测定土壤有机质含量、速效养分含量、酶活性指标, 并同步测定花生产量及品质相关指标。结果表明, 与 CK 相比, Y3 处理、Y4 处理在提升土壤有机质含量、速效养分含量、硝态氮含量、铵态氮含量以及土壤酶活性方面效果较好; 与 CK 相比, 2024 年 Y3 处理、Y4 处理花生荚果产量和籽仁产量显著提升 ($P < 0.05$); 与 CK 相比, Y2 处理、Y3 处理在连续 2 年试验中均能够显著提升花生籽仁油酸含量和亚油酸含量 ($P < 0.05$)。此外, 相关性分析结果显示, 土壤有机质含量、蔗糖酶活性与花生产量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 土壤脲酶活性与花生籽仁油酸含量和亚油酸含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。综上, 土壤土中施用一定量生物炭可改善土壤养分状况, 实现花生产量提升和品质优化; 其中 Y3、Y4 处理在提升土壤养分水平及花生产量方面综合表现较好, Y2、Y3 处理对花生籽仁品质的提升效果较好。

关键词: 有机肥; 生物炭; 土壤肥力; 花生; 产量; 品质

中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)01-0059-09

Effects of combined application of organic fertilizer and biochar on soil fertility and peanut yield

ZHANG Fengye, LI Ke, HE Qunling, CHEN Lei, ZHANG Mengyuan, WU Jihua, YANG Mingda, LIU Yiwei, ZOU Luyang

(Shangqiu Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shangqiu 476000, China)

Abstract: This study aims to clarify the effects of combined application of organic fertilizer and biochar on soil fertility, peanut yield, and quality in the main peanut production region of eastern Henan province, providing a theoretical basis for improving the soil environment and establishing a scientific and environmentally friendly fertilization system in this area. A field experiment was conducted in Minquan County, Shangqiu City, Henan province, using the high-oil and high-yield peanut variety Shanghua 21 as the test material. A randomized block design was employed with six treatments: conventional fertilization as the control (CK), conventional fertilization + organic fertilizer (Y1), and conventional fertilization + organic fertilizer combined with four different biochar application rates (2.5 t/hm², 3.0 t/hm², 3.5 t/hm², 4.0 t/hm², labeled Y2 to Y5, respectively). The experiment lasted for two consecutive years. Soil samples from the 0–20 cm layer were collected at peanut maturity stage to determine soil organic matter content, available nutrient content, and enzyme activity indicators. Peanut yield and quality-related indicators were measured simultaneously. The results showed that compared with CK, treatments Y3 and Y4

收稿日期: 2025-03-18

基金项目: 河南省重大科技专项 (221100110300); 河南省农业良种联合攻关项目 (20220100001); 河南省农业科研系统主要农作物育种测试协同体项目 (2024XTCX01)

作者简介: 张枫叶 (1982-), 女, 河南商丘人, 硕士, 副研究员, 主要从事花生种质资源与遗传育种研究。 (E-mail) fengyezhang666@126.com

通讯作者: 吴继华, (E-mail) 13598397765@163.com

performed better in enhancing soil organic matter content, available nutrient content, nitrate nitrogen content, ammonium nitrogen content, and soil enzyme activity. In 2024, compared with CK, treatments Y3 and Y4 significantly increased peanut pod yield and kernel yield ($P < 0.05$). Furthermore, compared with CK, treatments Y2 and Y3 significantly increased the oleic acid and linoleic acid content in peanut kernels over the two-year experiment ($P < 0.05$). Additionally, correlation analysis revealed that soil organic matter content and sucrase activity were significantly positively correlated with peanut yield ($P < 0.01$), and soil urease activity was significantly positively correlated with kernel oleic acid and linoleic acid content ($P < 0.01$). In conclusion, applying an appropriate amount of biochar in sandy loam soil can improve soil nutrient status, leading to increased peanut yield and optimized quality. Among the treatments, Y3 and Y4 showed better overall performance in improving soil nutrient levels and peanut yield, while Y2 and Y3 were more effective in enhancing peanut kernel quality.

Key words: organic fertilizer; biochar; soil fertility; peanut; yield; quality

生物炭是由作物秸秆等废弃生物质材料在缺氧或无氧条件下高温裂解生成的难溶且高度芳香化富碳土壤改良剂,其自身具有多孔结构、吸附点位多、比表面积大及表面官能团丰富等特点^[1-2]。生物炭作为集经济性、环保性于一体的“绿色材料”,能够在固碳减排及农业可持续发展等方面起到积极作用^[3-4]。前人研究表明,随着生物炭添加量的增加,土壤中速效磷、速效钾等速效养分含量呈正向提升趋势;同时,生物炭可通过触发离子交换机制,有效吸附硝态氮与铵态氮,进而减少其淋失量^[5-6]。生物炭对土壤酶及其底物的吸附作用,可增大酶与底物的接触概率,进而促进酶促反应进行,最终提升酶活性^[7]。此外,添加玉米秸秆生物炭能够缓解作物连作障碍,在改善土壤养分含量的同时,实现作物产量提升^[8]。相关研究结果进一步表明,生物炭添加量为3%(质量比)对作物产量及品质的提升效果最显著^[9]。与单施生物炭相比,有机肥与生物炭配施具有协同作用,能够更好地改良土壤、提高养分利用率并促进作物生长发育^[10]。目前,关于施用生物炭提升土壤养分及作物产量、品质的研究虽然很多,但是还存在两个关键问题,因此相关研究需要继续推进:一是生物炭种类繁多,不同种类生物炭性能差别较大;二是不同质地的土壤(比如沙土、黏土)适用的生物炭种类和用量也不同^[11]。有鉴于此,有必要通过设置不同生物炭施用量,研究其对特定区域农田土壤肥力和作物产量、品质的影响。

花生(*Arachis hypogaea* L.)作为中国重要的油料作物及经济作物,不仅具有耐贫瘠、固氮的特点,还是蛋白质和油脂的重要来源,兼具较高的经济价值与食用价值^[12-13]。土壤肥力是影响花生产量与品质的关键因素之一,邱雅洁等^[14]通过分析2012-

2022年Web of Science核心数据库及知网学术期刊数据库的文献,发现花生研究热点主要集中在土壤改良、肥料管理等领域。然而,在花生生育期内,施用传统化肥易导致养分淋失速率快、利用效率低等问题,进而制约花生的增产增效^[15]。前人研究结果表明,合理选择肥料类型、优化施肥方式及控制施用量,可显著提高花生荚果与籽仁的产量和品质^[16-17];反之,栽培管理不当或肥料施用不合理,则会对花生产量及品质产生不良影响^[18]。因此,适宜的肥料施用是改善花生种植区土壤肥力、实现花生提质增效的关键措施^[19]。此外,有研究者发现,添加生物炭可提高土壤养分含量,进而增加花生对营养元素的积累量,最终达到提升花生产量的效果^[20]。但不同种类生物炭,其芳构化程度、养分含量存在差异,比表面积也有所不同^[21],关于生物炭在花生栽培中的应用潜力仍需进一步发掘。基于此,本研究以有机肥为基肥,设置不同水平的秸秆生物炭处理,探究各处理对连作高油酸花生土壤肥力及产量、品质各项指标的影响,旨在为花生科学施肥提供有针对性的理论依据与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

本试验于河南省商丘市民权县民权农场十分场(115°23'E, 34°63'N)进行。该地区年平均温度14.1℃左右,年平均降水量674mm,年均无霜期213d。土壤类型为沙壤土,表层土壤(0~20cm)基本理化性质为:有机质含量12.74g/kg,碱解氮含量55.47mg/kg,速效磷含量19.27mg/kg,速效钾含量140.81mg/kg。供试花生品种商花21号为高油高产型,由商丘市农林科学院育成。供试化肥为复合

肥(N含量:P₂O₅含量:K₂O含量=15:15:15),总养分含量≥45%,由河南鄂中肥业有限公司提供;供试有机肥为腐熟羊粪(N、P₂O₅、K₂O含量分别为0.6%、1.6%、0.6%),总养分含量≥2.8%,由民权县兴禾有机肥业有限公司提供;供试生物炭为玉米秸秆(N、P₂O₅、K₂O含量分别为1.49%、5.40%、18.98%),总养分含量≥25.87%,有机碳含量≥42.08%,由河南立泽环保科技有限公司提供。

1.2 试验设计

采用定位试验,试验地采用随机区组排列,播前对花生种子进行发芽率试验(发芽率达92%以上),分别于2023年5月上旬、2024年5月上旬起垄,垄长8.34 m,垄距0.8 m,一垄双行,垄上行距0.25 m,穴距0.17 m,一穴2粒,播种深度3~5 cm。设置常规施肥作为对照(CK)、常规施肥+有机肥(Y1)、常规施肥+有机肥+生物炭用量4个水平(Y2~Y5)共6个处理,常规施肥的肥料为复合肥(N含量:P₂O₅含量:K₂O含量=15:15:15),具体施肥方案见表1。每个处理3次重复,小区面积设置为1.60 m×8.34 m。将羊粪有机肥与生物炭于播前一次性施入土壤,后期不追肥。花生生育期其余管理措施均参照大田常规方式进行,且连续2年播种及施肥方式均一致,9月中旬收获。

表1 不同处理施肥种类及施用量

Table 1 Types and amounts of fertilizers applied in different treatments

处理	复合肥用量 (kg/hm ²)	有机肥用量 (t/hm ²)	生物炭用量 (t/hm ²)
常规施肥(CK)	525	0	0
常规施肥+有机肥(Y1)	525	22.5	0
常规施肥+有机肥+生物炭(Y2)	525	22.5	2.5
常规施肥+有机肥+生物炭(Y3)	525	22.5	3.0
常规施肥+有机肥+生物炭(Y4)	525	22.5	3.5
常规施肥+有机肥+生物炭(Y5)	525	22.5	4.0

1.3 样品采集与测定

分别于2023年9月中旬、2024年9月中旬花生成熟期采集试验地土壤样品。采用5点取样法收集各处理0~20 cm表层土壤,混合为1个土壤样本后装袋密封带回实验室。新鲜土壤样品用于测定硝态氮含量与铵态氮含量;风干土壤样品过直径0.25 mm筛后,用于测定有机质含量、速效养分含量及酶

活性。其中,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,碱解氮含量采用碱解扩散法测定,速效磷含量采用钼锑抗比色法测定,速效钾含量采用火焰光度计法测定,硝态氮含量采用紫外分光光度法测定,铵态氮含量采用靛酚蓝比色法测定^[22];土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定,蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[23]。同一成熟期内,采集各处理小区所有花生植株,摘取荚果并风干晾晒后称重,随后剥壳称量籽仁重量。花生籽仁中油酸、亚油酸含量采用近红外谷物分析仪测定,该测定每个处理重复3次。

1.4 数据统计与分析

运用Microsoft Excel软件进行数据整理和统计,利用SPSS 25.0软件对数据进行差异性分析,利用Origin 2021软件对数据进行相关性分析并作图。

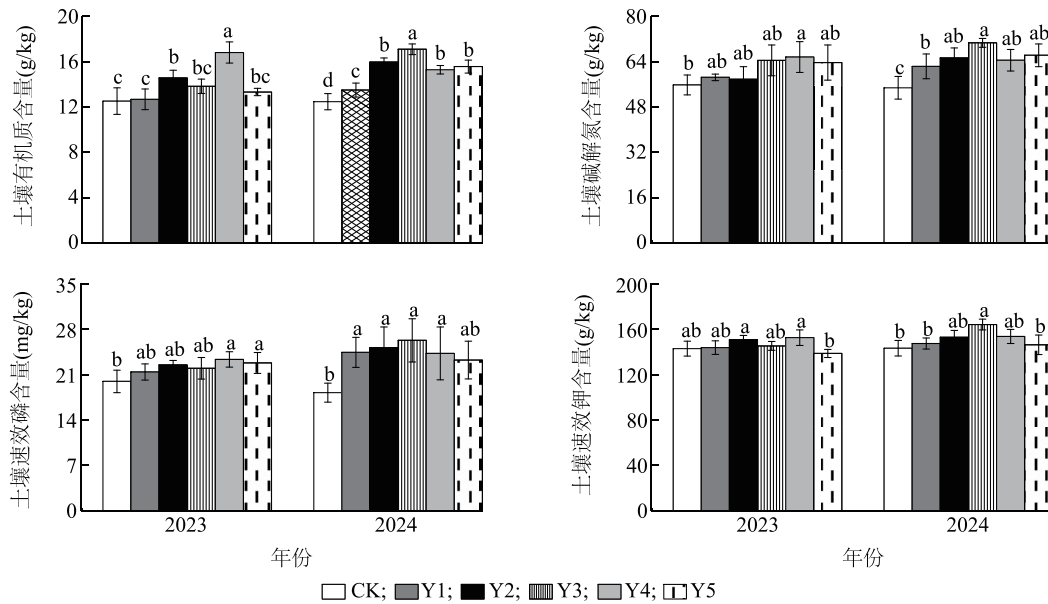
2 结果与分析

2.1 不同生物炭施用水平对土壤有机质含量及速效养分含量的影响

由图1可知,不同生物炭施用水平对土壤有机质含量及速效养分含量影响不同。相较CK,2023年Y2处理、Y4处理土壤有机质含量显著提升($P<0.05$),增幅分别为16.30%、34.25%;2024年Y1~Y5处理土壤有机质含量均显著提升($P<0.05$),增幅分别为8.21%、28.05%、37.09%、22.60%、24.81%。相较CK,2023年Y4处理土壤碱解氮含量显著提升($P<0.05$),增幅为17.64%;2024年Y1~Y5处理土壤碱解氮含量均显著提升($P<0.05$),增幅分别为13.79%、19.24%、28.95%、17.72%、20.92%。相较CK,2023年Y4处理、Y5处理土壤速效磷含量显著提升($P<0.05$),增幅分别为16.96%、14.27%;2024年Y1~Y4处理土壤速效磷含量显著提升($P<0.05$),增幅分别为34.19%、38.23%、44.34%、33.27%。相较CK,2023年各处理土壤速效钾含量差异性均不显著($P>0.05$),2024年Y3处理土壤速效钾含量提升效果显著($P<0.05$),增幅为14.55%。

2.2 不同生物炭施用水平对土壤硝态氮含量、铵态氮含量的影响

由图2可知,不同生物炭施用水平对土壤硝态氮含量及铵态氮含量有不同程度影响。相较CK,2023年Y4处理、Y5处理土壤硝态氮含量显著提升



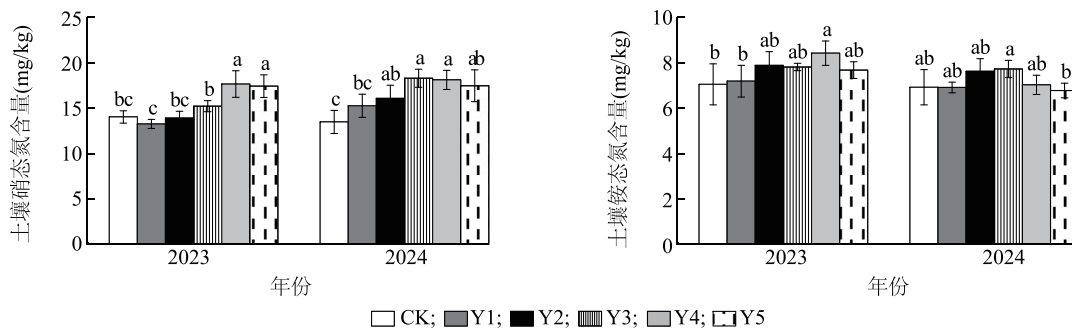
CK, Y1~Y5 见表 1。同一年份图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 施用生物炭对花生土壤有机质含量及速效养分含量的影响

Fig.1 Effects of biochar application on soil organic matter and available nutrient contents in peanut field

($P < 0.05$), 增幅分别为 25.89%、24.22%; 2024 年 Y2~Y5 处理土壤硝态氮含量显著提升 ($P < 0.05$), 增幅分别为 19.35%、35.81%、34.45%、29.62%。

相较 CK, 2023 年 Y4 处理土壤铵态氮含量显著提升 ($P < 0.05$), 增幅为 19.49%; 2024 年各处理土壤铵态氮含量差异未达到显著水平 ($P > 0.05$)。



CK, Y1~Y5 见表 1。同一年份图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 施用生物炭对花生土壤硝态氮含量及铵态氮含量的影响

Fig.2 Effects of biochar application on soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents in peanut field

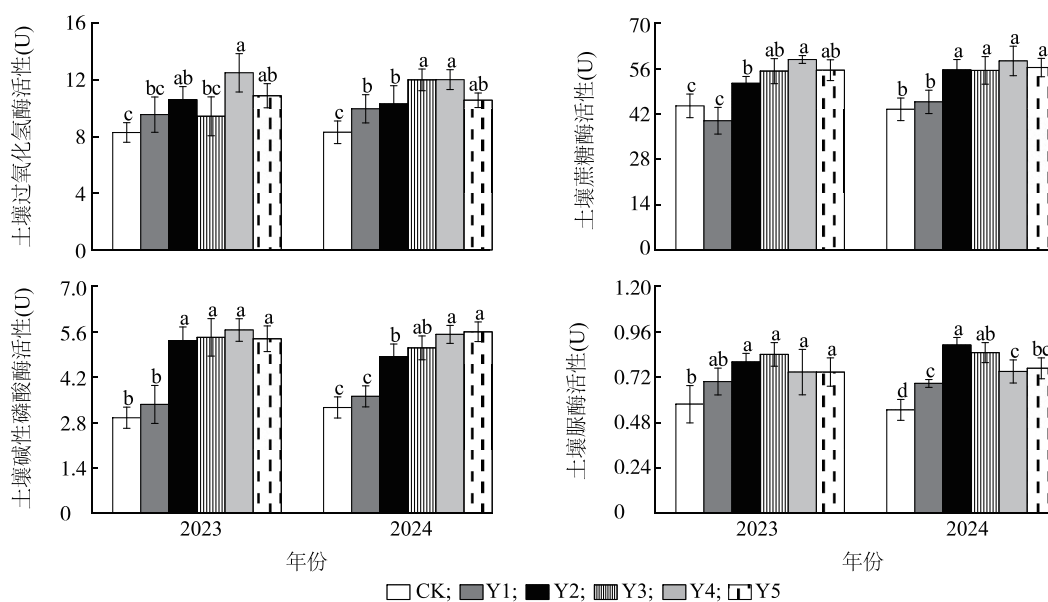
2.3 不同生物炭施用水平对土壤酶活性的影响

由图 3 可知, 相较 CK, 2023 年 Y2 处理、Y4 处理、Y5 处理土壤过氧化氢酶活性显著提升 ($P < 0.05$), 增幅分别为 27.93%、50.83%、31.35%; 2024 年 Y1~Y5 处理土壤过氧化氢酶活性提升幅度均达显著水平 ($P < 0.05$), 增幅分别为 19.92%、24.06%、44.54%、44.74%、27.23%。相较 CK, 连续两年试验 Y2~Y5 处理土壤蔗糖酶活性均显著提升 ($P < 0.05$)。相较 CK, 连续两年 Y2~Y5 处理土壤碱性磷

酸酶活性均显著提升 ($P < 0.05$)。相较 CK, 2023 年 Y2~Y5 处理土壤脲酶活性显著提升 ($P < 0.05$); 2024 年 Y1~Y5 处理土壤脲酶活性均显著提升 ($P < 0.05$)。

2.4 不同生物炭施用水平对花生荚果及籽仁产量的影响

由图 4 可知, 就花生荚果产量而言, 与 CK 相比, 2023 年 Y1~Y5 处理均不存在显著性差异 ($P > 0.05$); 2024 年 Y3 处理、Y4 处理在提升花生荚果产



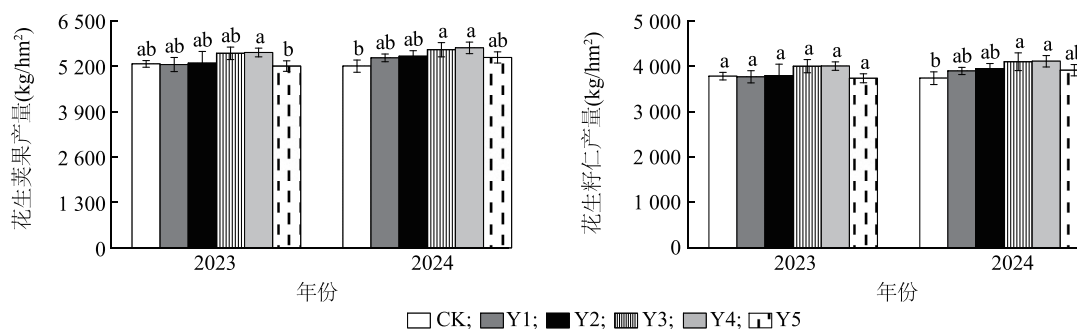
CK、Y1~Y5 见表 1。同一年份图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 施用生物炭对花生土壤酶活性的影响

Fig.3 Effects of biochar application on soil enzyme activities in peanut field

量方面效果显著 ($P < 0.05$), 增幅分别为 9.04%、10.09%。就花生籽仁产量而言, 与 CK 相比, 2023 年 Y1~Y5 处理均不存在显著性差异 ($P > 0.05$);

2024 年 Y3 处理、Y4 处理花生籽仁产量显著提升 ($P < 0.05$), 增幅分别为 10.15%、11.20%。



CK、Y1~Y5 见表 1。同一年份图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 施用生物炭对花生荚果产量及籽仁产量的影响

Fig.4 Effects of biochar application on peanut pod yield and kernel yield

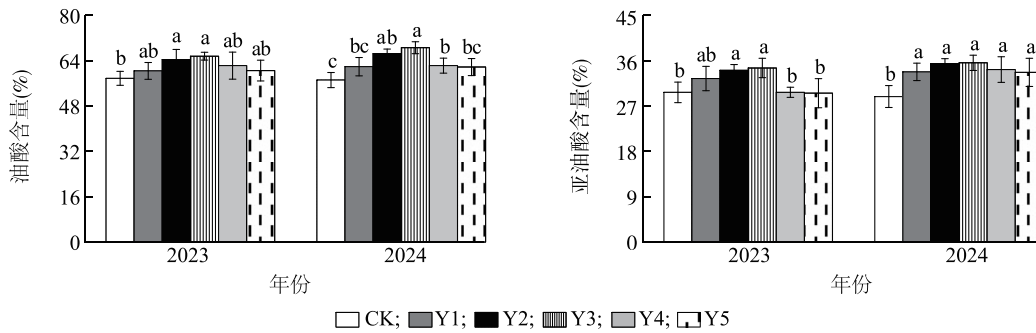
2.5 不同生物炭施用水平对花生籽仁油酸及亚油酸含量的影响

由图 5 可知, 不同生物炭施用水平对花生籽仁油酸及亚油酸含量的影响差异较大。与 CK 相比, 2023 年 Y2 处理、Y3 处理花生籽仁油酸含量显著提升 ($P < 0.05$); 2024 年 Y2~Y4 处理花生籽仁油酸含量显著提升 ($P < 0.05$)。与 CK 相比, 2023 年 Y2 处理、Y3 处理花生籽仁亚油酸含量显著提升 ($P < 0.05$); 2024 年 Y1~Y5 处理花生籽仁亚油酸含量均

显著提升 ($P < 0.05$)。

2.6 土壤肥力及花生产量、品质各指标间的相关性

由表 2 可知, 花生荚果产量和籽仁产量与土壤有机质含量、蔗糖酶活性呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与土壤速效养分含量、硝态氮含量及过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性呈显著正相关 ($P < 0.05$)。由花生荚果产量和籽仁产量与土壤肥力指标相关性可知, 花生土壤有机质含量、速效养分含量、硝态氮含量、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、碱性



CK, Y1~Y5 见表 1。同一年份图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 施用生物炭对花生油酸及亚油酸含量的影响

Fig.5 Effects of biochar application on oleic acid and linoleic acid contents in peanut

磷酸酶活性与花生产量之间关系密切,特别是土壤有机质含量、蔗糖酶活性对花生产量影响更大。花生籽仁油酸含量与土壤脲酶活性呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与土壤有机质含量、速效养分含量、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性呈显著正相关 ($P < 0.05$),说明土壤有机质含量及速效养分含量和过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性对籽

仁油酸含量的形成具有较大影响,土壤脲酶活性对花生籽仁油酸含量影响最大。花生籽仁亚油酸含量与土壤脲酶活性呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与土壤有机质含量、速效磷含量、速效钾含量呈显著正相关 ($P < 0.05$),说明土壤有机质含量、速效磷含量、速效钾含量对花生籽仁亚油酸含量的形成具有较大影响,土壤脲酶活性对花生籽仁亚油酸含量影响最大。

表 2 土壤肥力与花生产量、品质间的相关关系

Table 2 Correlations between soil fertility and peanut yield and quality

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_{11}	0.65**	0.52*	0.50*	0.41*	0.50*	0.25	0.48*	0.57**	0.42*	0.32
X_{12}	0.64**	0.51*	0.49*	0.41*	0.49*	0.25	0.48*	0.55**	0.41*	0.32
X_{13}	0.51*	0.50*	0.47*	0.49*	0.29	0.24	0.33*	0.45*	0.46*	0.63**
X_{14}	0.45*	0.32	0.43*	0.40*	0.12	-0.03	0.20	0.24	0.29	0.54**

X_1 :土壤有机质含量; X_2 :土壤碱解氮含量; X_3 :土壤速效磷含量; X_4 :土壤速效钾含量; X_5 :土壤硝态氮含量; X_6 :土壤铵态氮含量; X_7 :土壤过氧化氢酶活性; X_8 :土壤蔗糖酶活性; X_9 :土壤碱性磷酸酶活性; X_{10} :土壤脲酶活性; X_{11} :荚果产量; X_{12} :籽仁产量; X_{13} :油酸含量; X_{14} :亚油酸含量。**表示在 0.01 水平(双尾)相关性极显著,*表示在 0.05 水平(双尾)相关性显著。

3 讨论

3.1 不同生物炭施用水平对花生土壤肥力的影响

土壤养分作为评价土壤肥力状况的重要性指标,对作物的养分吸收及生长发育起关键作用^[24]。杨铭等^[25]的研究结果表明,施用生物炭在改善土壤结构,促进养分分解、转化,提升土壤有机质含量、速效养分含量方面效果显著。本研究发现,在复合肥和有机肥中添加不同水平的生物炭,对土壤养分的影响程度不同。其中,2023 年以 Y4 处理在提升土壤有机质含量、速效养分含量、硝态氮含量、铵态氮含量方面效果较好;2024 年则以 Y3 处理提升效果较好。由此说明,不同用量生物炭处理对土壤养分

的提升效果存在年际效应。原因可能在于不同用量会导致生物炭对土壤养分的吸附及固持作用产生差异,且生物炭具有缓效性、长效性等特点,随着年份的增长,特定用量生物炭的作用效果更加突出^[26]。生物炭对土壤酶活性的影响具有差异性。有学者认为,生物炭表面-COOH、-OH 等官能团会与酶的氨基(-NH₂)发生脱水缩合反应,影响酶与底物结合,进而导致酶活性降低;也有学者认为,生物炭对土壤酶及其底物的吸附作用能够提升酶与底物的接触频率,推动酶促反应,从而提升酶活性^[7]。本研究发现,与 CK 相比,2023 年 Y2 处理、Y4 处理、Y5 处理能够显著提升土壤酶活性 ($P < 0.05$);2024 年 Y2~Y5 处理能够显著提升土壤酶活性 ($P < 0.05$)。综合

来看,施用生物炭对提升土壤酶活性具有积极作用,产生这一结果的原因可能是不同用量生物炭在刺激产酶微生物代谢,缓解酶活性抑制及平衡酶与底物接触效率方面存在差异,从而对土壤酶活性产生影响^[26]。

3.2 不同生物炭施用水平对花生产量及品质的影响

改善土壤肥力对作物高产起至关重要的作用^[27]。王文慧等^[28]研究发现,与常规施肥相比,不同生物炭添加量均能提升作物产量,且作物产量提升效果随生物炭施用量的增加呈现先升高后降低的趋势。俞若涵等^[29]研究发现,施用一定量的生物炭对促进作物生长发育具有显著效果,但当生物炭施用量达到一定水平时,增产增收效果趋弱。本研究发现,与CK相比,2023年不同生物炭施用水平均未能显著提升花生荚果产量及籽仁产量($P>0.05$);2024年Y3处理、Y4处理能够显著提升花生荚果产量及籽仁产量($P<0.05$)。由此说明,生物炭的长效性及缓效性能够为土壤养分积累提供更加便利的条件,从而促进作物养分吸收,达到增产效果。本研究中生物炭提升作物产量的效果与上述学者研究结果类似,原因可能在于生物炭施用量在提升作物产量方面存在阈值,用量过高会加剧速效养分的生物固定,导致土壤中微生物与作物在吸收有效态养分方面产生竞争关系,从而限制作物生长发育,抑制作物产量进一步提升^[30]。此外,生物炭除了能够提升作物产量以外,在改善作物油酸含量、亚油酸含量等方面也发挥积极作用^[31]。徐绮雯等^[32]研究发现,施用生物炭在提升油菜产量的同时,还有助于降低油菜籽中脂肪酸含量,提升油酸含量。本研究中,与CK相比,2023年Y2处理、Y3处理可显著提升花生籽仁油酸含量和亚油酸含量($P<0.05$);2024年Y2处理、Y3处理、Y4处理可显著提升花生籽仁油酸含量和亚油酸含量($P<0.05$),整体看,花生籽仁油酸及亚油酸含量均随生物炭施用水平的提升呈现先升高后降低的趋势。花生籽仁油酸及亚油酸含量提升的主要原因可能在于施用生物炭能够有效改变土壤养分供给能力,调节土壤肥力状况,促进有效养分向作物转运,从而改善作物体内脂肪酸的合成和积累^[33]。

3.3 土壤肥力及花生产量、品质各指标间的相关性

通过土壤肥力与花生产量、品质指标的相关性

分析可知,土壤养分供给与花生荚果产量、籽仁产量、籽仁油酸含量、亚油酸含量关系密切。生物炭的多孔结构及稳定的碳库可改善土壤养分含量及土壤结构,为微生物提供基质,激活土壤酶系统活性^[34-36]。前人研究结果表明,生物炭在改善土壤pH、阳离子交换容量等土壤理化性质的同时,还能间接促进有机质的积累,有机质含量提高能够提升土壤保水保肥能力。此外,生物炭可通过激活土壤蔗糖酶活性,加速碳循环,最终达到改善作物根系发育、促进光合产物向籽粒转运,最终达到提升荚果产量的目的,使有机质含量、蔗糖酶活性与荚果之间呈现正向反馈效果^[37-38]。胡宇迪等^[20]研究发现,生物炭能够显著提升土壤碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量,达到有效提升花生产量的效果,使土壤速效养分与荚果产量间存在正向反馈关系。本研究发现,土壤有机质含量、速效养分含量、蔗糖酶活性与花生荚果产量、籽仁产量呈极显著或显著正相关,与上述研究结果一致,原因可能在于土壤有机质含量、速效养分含量的提升可有效改善土壤结构、缓释养分及激活微生物群落,并且生物炭通过增加微生物底物供应,显著提升蔗糖酶活性,促进土壤碳水化合物分解,增强根系对养分的吸收,从而满足花生不同生育期对养分的需求,最终达到提升产量的效果^[38]。脲酶活性会直接影响氮素供应效率,充足的氮素供应对花生籽仁油酸的合成具有促进作用^[39-40]。Lillo等^[41]研究发现,生物炭可通过持续提升土壤脲酶活性,显著提升麦类作物油酸含量,从而使土壤脲酶活性与油酸含量呈显著正相关($P<0.05$)。本研究发现,土壤脲酶活性与花生籽仁油酸及亚油酸含量均存在极显著的正向反馈关系($P<0.01$),与上述研究结果具有一致性,原因可能在于生物炭具有稳定碳库,可持续提升土壤脲酶活性,土壤脲酶再通过调控氮素有效性,进而影响花生籽仁油酸及亚油酸含量。

4 结论

本研究通过连续2年对大田花生施用不同水平生物炭,结果发现,适宜生物炭添加量在提升土壤肥力及花生产量、品质方面具有积极作用。其中Y3、Y4处理在提升土壤养分含量及花生产量方面综合表现较好,Y2、Y3处理对花生籽仁品质的提升效果较好。本研究结果可以为花生科学施肥提供理

论依据与数据支撑。需注意的是,本研究结果仅基于2年定位试验,且生物炭本身具有长效性、缓效性特点,因此后续还需从时间维度进一步深入研究其对土壤肥力及作物产量、品质等指标的影响。

参考文献:

- [1] DAI Y H, ZHENG H, JIANG Z X, et al. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth; a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136635.
- [2] HUSSAIN R, GHOSH K K, GARG A, et al. Effect of biochar produced from mesquite on the compaction characteristics and shear strength of a clayey sand [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 39(2): 1117-1131.
- [3] 刘汉龙. 绿色地基处理技术探讨[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(7): 121-128.
- [4] 何甜甜, 王静, 符云鹏, 等. 等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 450-458.
- [5] 王桂君, 许振文, 路倩倩. 生物炭对沙化土壤理化性质及作物幼苗的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(11): 246-248.
- [6] SAARNIO S, KETTUNEN R. Biochar addition affected nutrient leaching and litter decomposition rates in boreal sandy soils [J]. *Agricultural and Food Science*, 2020, 29(4): 287-296.
- [7] 李博文, 刘洋, 李宗霖, 等. 生物炭对土壤酶活性影响的机理研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(7): 163-168.
- [8] 孙义卓, 蔡姗姗, 陈雪丽, 等. 不同改良剂对黑土区大豆连作土壤养分平衡及细菌群落的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(4): 127-135.
- [9] ABD EL-AZEIM M M, MENESI A M, ABD EL-MAGEED M M, et al. Wheat crop yield and changes in soil biological and heavy metals status in a sandy soil amended with biochar and irrigated with drainage water [J]. *Agriculture*, 2022, 12(10): 1723.
- [10] PANDIT N R, SCHMIDT H P, MULDER J, et al. Nutrient effect of various composting methods with and without biochar on soil fertility and maize growth [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 66(2): 250-265.
- [11] 赵维彬, 王松, 刘玲玲, 等. 生物炭改良盐碱地效果及其对植物生长的影响研究进展[J]. *土壤通报*, 2024, 55(2): 551-561.
- [12] 谷明轩, 刘凤珍, 孙伟, 等. 黄腐酸通过调控花生根系形态及活力促进幼苗生长[J]. *花生学报*, 2023, 52(1): 63-71.
- [13] 杨力剑, 宁露, 梁兆君, 等. 分层施肥对花生田土壤养分动态变化的影响研究[J]. *花生学报*, 2024, 53(2): 20-30.
- [14] 邱雅洁, 李国强, 臧秀旺, 等. 基于文献计量分析的花生育种及栽培研究热点与趋势[J]. *花生学报*, 2024, 53(3): 88-104.
- [15] CAHYANTI M N, DODDAPANENI T R K C, KIKAS T. Biomass torrefaction: an overview on process parameters, economic and environmental aspects and recent advancements [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301: 122737.
- [16] LI G H, GUO X, SUN W, et al. Nitrogen application in pod zone improves yield and quality of two peanut cultivars by modulating nitrogen accumulation and metabolism [J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1): 48.
- [17] 孔洁, 王维华, 滴益民, 等. 分层施肥对花生光合特性、产量及籽仁品质的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2023, 45(3): 574-582.
- [18] 高传俊, 杨晨曦, 高欣, 等. 种植模式对科尔沁沙地土壤微生物群落的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(4): 162-169.
- [19] 韩鹏, 刘环环, 王立光, 等. 化肥减量及配施有机肥对冀花19号综合经济效益的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2024, 42(5): 986-991.
- [20] 胡宇迪, 汪玉瑛, 刘玉学, 等. 不同来源生物炭与化肥减量配施对土壤养分、花生产量及品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(1): 105-111.
- [21] HASSAN M, LIU Y J, NAIDU R, et al. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents; a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140714.
- [22] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 朱长伟, 龙潜, 董士刚, 等. 小麦-玉米轮作体系不同旋耕和深耕管理对潮土微生物量碳氮与酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(1): 51-63.
- [25] 杨铭, 杜星佑, 吕仿杰, 等. 不同轮耕模式与生物炭还田对小麦产量、品质及土壤肥力的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(18): 91-98.
- [26] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 422-432.
- [27] 朱长伟, 孟威威, 石柯, 等. 不同轮耕模式下小麦各生育时期土壤养分及酶活性变化特征[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(21): 4237-4251.
- [28] 王文慧, 蒋志慧, 张纪, 等. 生物炭对大豆根际土壤酶活性及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(6): 147-153.
- [29] 俞若涵, 姚奇, 杨明晓, 等. 生物炭对夏玉米农田土壤有效养分垂直分布及作物利用的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(1): 137-142.
- [30] YAO Y, GAO B, ZHANG M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467-1471.
- [31] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1): 235-246.
- [32] 徐绮雯, 马淑敏, 朱波, 等. 生物炭与化肥配施对紫色土肥力与微生物特征及油菜产量品质的影响[J]. *草业学报*, 2020, 29(5): 121-131.
- [33] 赵耀东, 侯江涛. 减氮配施生物炭对花生-油菜轮作系统土壤肥力和花生产量与氮素利用的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(23): 81-87.
- [34] 马林杰, 张诚信, 覃宝利, 等. 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. *江苏农业学*

- 报,2024,40(9):1623-1632.
- [35] 董成,冯发运,马丽雅,等. 生物炭固定化菌剂对毒死蜱污染土壤的修复及小白菜品质的改善[J]. 江苏农业学报,2024,40(5):846-854.
- [36] 王瑞飞,孔盈利,魏艺璇,等. 菌剂对鸡粪-生物炭堆肥理化性质和微生物群落结构的影响[J]. 江苏农业学报,2023,39(4):966-977.
- [37] HE K, XU Y, HE G, et al. Combined application of acidic biochar and fertilizer synergistically enhances *Miscanthus* productivity in coastal saline-alkaline soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2023,893:164811.
- [38] 闫新伟,王艳芳,李继伟,等. 施用生物炭对旱作花生生长和产量构成及土壤酶活性的影响[J]. 河南科技大学学报,2018,39(3):66-70,8.
- [39] 李东坡,武志杰,陈利军,等. 长期培肥黑土脲酶活性动态变化及其影响因素[J]. 应用生态学报,2003,14(12):2208-2212.
- [40] 张佳蕾,王媛媛,孙莲强,等. 多效唑对不同品质类型花生产量、品质及相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(10):2850-2856.
- [41] LILLO P, DEL MAR DELGADO M, PORCEL M Á, et al. Organic amendments drive agroecosystem multifunctionality and soil micro-food web short-term dynamics [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025,388:109657.

(责任编辑:黄克玲)