

引用格式:

赵晨博, 张玉平, 王艺哲, 黄扬基, 叶京华, 罗功文. 秸秆填埋对间作系统土壤有效养分累积和酶活性及微生物养分利用的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(5): 75–85.

ZHAO C B, ZHANG Y P, WANG Y Z, HUANG Y J, YE J H, LUO G W. Effects of straw burial on soil available nutrient accumulation, enzyme activity and microbial nutrient utilization in intercropping system[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(5): 75–85.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



秸秆填埋对间作系统土壤有效养分累积和酶活性 及微生物养分利用的影响

赵晨博¹, 张玉平^{1,2}, 王艺哲¹, 黄扬基¹, 叶京华¹, 罗功文^{1,2*}

(1. 湖南农业大学资源学院, 湖南 长沙 410128; 2. 农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: 依托长期定位试验的4种玉米种植模式, 即玉米单作(M-M)、玉米-芝麻间作(M-G)、玉米-花生间作(M-P)和玉米-大豆间作(M-S), 设置原位网袋秸秆填埋和不填埋2个裂区处理, 并于玉米种植的135 d内每隔15 d收集网袋及网袋周边土壤样品, 探究不同间作系统下填埋秸秆对土壤养分累积、微生物量、碳氮磷获取酶活性以及玉米产量的影响。结果表明: 间作模式耦合秸秆填埋能提高速效养分的含量, 促进作物对养分的吸收和玉米增产, 与未填埋秸秆相比, M-P模式下填埋秸秆处理的土壤可溶性有机碳、碱解氮、速效磷含量的最大增幅分别达41.9%、47.7%和97.8%; M-S模式下填埋秸秆处理的土壤速效钾含量的最大增幅达32.8%; 填埋秸秆处理下, 与M-M模式相比, M-S和M-P模式下玉米分别增产44.4%、61.3%。间作模式耦合秸秆填埋能提高土壤微生物量, 与未填埋秸秆处理相比, M-P模式下填埋秸秆处理的土壤微生物量碳、氮的最大增幅分别达47.3%、48.9%, 土壤微生物量碳氮、碳磷利用效率的比值最大降幅分别为37.6%、50.8%; M-S模式下填埋秸秆处理的土壤微生物量磷含量的最大增幅达42.8%, 土壤微生物量碳氮、氮磷利用效率的比值最大增幅分别达37.9%、32.1%。填埋秸秆增强了碳氮磷获取酶的活性, 与未填埋秸秆处理相比, M-S模式下填埋秸秆处理的脲酶、酸性磷酸酶、纤维二糖水解酶活性及氮获取酶潜在活性最大增幅分别达95.2%、59.3%、35.4%、50.6%; M-P模式下填埋秸秆处理的碱性磷酸酶、亮氨酸氨基肽酶、蛋白酶活性及磷获取酶潜在活性的最大增幅分别达88.7%、53.6%、38.9%、24.3%。填埋秸秆处理的速效养分含量与多数土壤碳氮磷循环相关生物化学功能指标呈显著或极显著正相关。由此可见, 间作模式与秸秆填埋的协同作用能提高土壤肥力、微生物量、酶活性等, 促进玉米对养分的吸收, 从而提高玉米产量。

关键词: 玉米; 间作; 秸秆填埋; 土壤养分; 微生物量; 土壤酶活性

中图分类号: S513.047; S141.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)05-0075-11

Effects of straw burial on soil available nutrient accumulation, enzyme activity and microbial nutrient utilization in intercropping system

ZHAO Chenbo¹, ZHANG Yuping^{1,2}, WANG Yizhe¹, HUANG Yangji¹, YE Jinghua¹, LUO Gongwen^{1,2*}

(1. College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Farmland Pollution Control and Agricultural Resources Utilization, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: Based on the long-term field positioning experiment, four corn planting patterns, corn monoculture(M-M), corn-sesame intercropping(M-G), corn-peanut intercropping(M-P), and corn-soybean intercropping(M-S), and two treatments in-situ bagged straw burial and non-straw burial, were prepared. Soil samples from the bags and the

收稿日期: 2024-12-29

修回日期: 2025-03-20

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2023NK2026)

作者简介: 赵晨博(1997—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事多样化种植与作物生产研究, 13137001077@163.com; *通信作者, 罗功文, 博士, 副教授, 主要从事耕地质量保育、作物健康与产能提升、新型多功能微生物产品开发等研究, gongwenluo@hunau.edu.cn

surrounding soil were collected every 15 days within 135 days after maize planting to explore the effects of buried straw under different intercropping systems on soil nutrient accumulation, microbial biomass, carbon, nitrogen, and phosphorus acquisition enzyme activities, and corn yield. The results showed that the intercropping pattern coupled with straw burial could increase the content of available nutrients, promote nutrient absorption by crops, and increase corn yield. Compared with the treatment without straw burial, the treatment with straw burial in the M-P pattern had the largest increase in soil soluble organic carbon, alkali-hydrolyzable nitrogen, and available phosphorus contents, which could increase by 41.9%, 47.7%, and 97.8%, respectively. The soil available potassium content of the treatment with straw burial in the M-S pattern increased by a maximum of 32.8%. Under the treatment with straw burial, compared with the M-M patterns, the corn yields in the M-S and M-P patterns increased by 44.4% and 61.3%, respectively. The intercropping pattern coupled with straw burial could increase soil microbial biomass. Compared with the treatment without straw burial, the soil microbial biomass carbon and nitrogen contents of the treatment with straw burial in the M-P pattern increased by a maximum of 47.3% and 48.9%, respectively, and the ratios of soil microbial biomass carbon-nitrogen and carbon-phosphorus utilization efficiency decreased by a maximum of 37.6% and 50.8%, respectively. The soil microbial biomass phosphorus content of the treatment with straw burial in the M-S pattern increased by a maximum of 42.8%, and the ratios of soil microbial biomass carbon-nitrogen and nitrogen-phosphorus utilization efficiency increased by a maximum of 37.9% and 32.1%, respectively. Buried straw enhanced the activities of carbon, nitrogen, and phosphorus acquisition enzymes. Compared with the treatment without straw burial, the treatment with straw burial in the M-S pattern had the largest increase in urease, acid phosphatase, cellobiose hydrolase activities, and potential activities of nitrogen acquisition enzymes, which could increase by 95.2%, 59.3%, 35.4%, and 50.6%, respectively; the treatment with straw burial in the M-P pattern had the largest increase in alkaline phosphatase, leucine aminopeptidase, protease activities, and potential activities of phosphorus acquisition enzymes, which could increase by 88.7%, 53.6%, 38.9%, and 24.3%, respectively. The contents of available nutrients under the treatment with straw burial were significantly or extremely significantly positively correlated with most biochemical functional indicators for soil carbon, nitrogen, and phosphorus cycling. Therefore, the synergistic effect of intercropping patterns and straw burial could improve soil fertility, microbial biomass, enzyme activities, etc., promote nutrient absorption by corn, and increase corn yield.

Keywords: corn; intercropping; straw burial; soil nutrients; microbial biomass; soil enzyme activity

玉米生长需要大量养分供给,然而单作模式下玉米的肥料利用率低,同时土壤养分残留量高,导致土壤养分失调和作物歉收的风险增加^[1]。研究^[2]表明,间作可实现作物时间与空间的集约化利用,充分发挥间作作物之间的互补优势,促进作物养分吸收和增产。因此,间作是粮食增产的重要措施之一^[3]。有研究^[4]表明,玉米与其他作物间作可能会降低土壤养分残留量,不利于后茬作物的生长。玉米与大豆间作是一种常见的间作模式,既能保证玉米产量又能发挥大豆固氮作用;玉米与花生间作可显著增加两者干物质积累量;玉米与芝麻间作可通过优化田间配置、良品搭配、科学施肥,实现高低作物优势互补、协同成长,达到“玉米基本不减产、多收一季作物”的产量效益,同时增强农田生态系统稳定性和降低病虫害等风险^[5]。秸秆还田作为一种有效的培肥地力的措施,能有效提高土壤微生物活性和土壤有机质含量,从而增加作物产量^[6]。还有研究^[7]表明,玉米间作结合秸秆还田措施,不仅能减少化肥用量、提升农业系统可持续性,还能提

升作物生产力,进而确保粮食稳产。此外,间作和秸秆填埋都可通过促进养分循环来提高玉米生产力,并通过增加土壤孔隙度、持水能力和土壤团聚体间接提高玉米生产力和改善土壤肥力^[8]。但关于作物间作条件下秸秆还田后的腐解特征及其对土壤肥力的影响机制研究仍较少。

本研究基于长期定位试验平台,在玉米-芝麻间作、玉米-花生间作和玉米-大豆间作等3种间作系统下,开展玉米秸秆原位填埋试验,探究不同间作系统下秸秆填埋对玉米旱地土壤养分累积、微生物生物量、碳氮磷获取酶活性及微生物养分利用的影响,以期解析间作耦合秸秆还田培肥土壤、提升玉米生产力的机制提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地处湖南省浏阳市沿溪镇(28°19'N, 113°49'E)。该地区为亚热带季风性湿润气候,年均降水量为1 128.5 mm,年均日照时数为1 440 h,年

均气温为23 °C。供试土壤为河流冲积物发育的潮土, 试验初期土壤pH为5.69, 有机质、全氮、全磷质量分数分别为11.30、1.56、0.48 g/kg, 速效磷、速效钾质量分数分别为12.23、152.24 mg/kg。

1.2 试验设计

长期定位试验(2013年建立)设置了玉米单作(M-M)、玉米-芝麻间作(M-G)、玉米-花生间作(M-P)和玉米-大豆间作(M-S)等4种植植模式, 每种模式3次重复, 采用随机区组设计, 每小区面积为20 m²。所施用的氮、磷、钾肥分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾, 且全部以底肥施入。各种作物所施肥料用量如表1所示。供试玉米品种为‘掖单13号’, 花生品种为‘湘花522’, 大豆品种为‘湘春豆37’, 芝麻品种为‘湘芝10号’。于每年3月种植玉米, 株行距为35 cm×40 cm, 且同时采用2:2方式(2行玉米、2行间作作物)播种芝麻、花生和大豆。本研究在长期定位试验的基础上, 采用裂区设计方法, 将每个试验小区分为2块地, 其中一块填埋玉米秸秆, 另一块不填埋秸秆为对照。填埋的玉米秸秆来源于本地块上一年收获的玉米植株, 将其烘干后剪成若干碎块, 并装入尼龙网袋, 每袋100 g(干质量)。于2022年春季, 在玉米播种当天, 将装有100 g(干质量)玉米秸秆的尼龙网袋填埋在种植玉米的土壤中, 玉米秸秆的尼龙网袋分别埋设于单作的玉米行间及玉米与间作作物行间, 填埋深度为25 cm, 每个地块填埋9个网袋。玉米种植135 d, 于8月初同步收获4种处理的玉米, 并按实际面积测算产量。为了避免轮作的影响, 所有地块在收获玉米和间作作物后均休耕。

表1 各种作物的肥料施用量

作物	施用量/(kg·hm ⁻²)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
玉米	240	150	150
芝麻	120	570	110
花生	240	120	200
大豆	160	40	70

1.3 样品采集

于玉米种植的135 d内, 每15 d(15、30、45、60、75、90、105、120、135 d)取出1个装有玉米秸秆的网袋, 收集网袋表面附着的土壤和网袋内部抖落出来的土壤作为填埋秸秆的土样; 同时, 在同一种植

模式未填埋秸秆的地块收集相同位置的土壤作为未填埋秸秆的土样。剔除土壤样品中的动、植物残体和石块, 过孔径为2 mm的筛后混匀并分为两部分, 一部分土样经自然风干后测定土壤理化指标; 一部分新鲜土样于4 °C下保存, 用于土壤微生物量及土壤碳氮磷获取酶活性的测定。

1.4 测定指标与方法

参照文献[9]的方法, 测定土壤总碳(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、可溶性有机碳(DOC)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)含量。

采用氯仿熏蒸法^[10]测定微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)和微生物量磷(MBP)含量。参照文献[11]的方法, 计算微生物养分利用效率化学计量比, 包括MBC和MBN利用效率的比值(CUE:NUE)、MBC和MBP利用效率的比值(CUE:PUE)、MBN和MBP利用效率的比值(NUE:PUE)。

采用荧光定量法^[12]测定β-葡萄糖苷酶(BG)、β-木糖苷酶(BX)、纤维二糖水解酶(CBH)和α-葡萄糖苷酶(AG)等C获取酶活性及亮氨酸氨基肽酶(LAP)和β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖酶(NAG)等N获取酶活性; 采用苯酚-次氯酸钠比色法^[13]测定脲酶(Ure)活性; 采用比色法^[14]测定蛋白酶(SP)活性; 采用磷酸苯二钠比色法^[15]测定酸性磷酸酶(ACP)和碱性磷酸酶(ALP)等P获取酶活性。参照文献[16]的方法, 计算所测C、N、P获取酶活性的几何平均值C-acq、N-acq、P-acq。

1.5 数据统计与分析

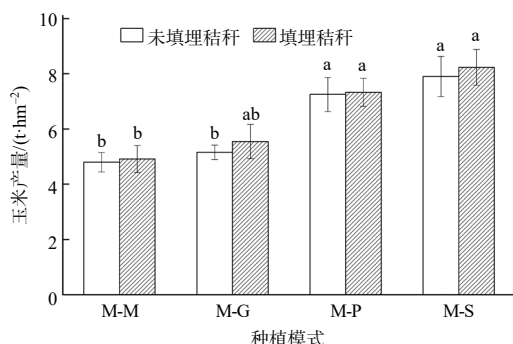
所有指标均计算同一时间和种植模式下填埋秸秆处理的值较未填埋秸秆处理的值的增长率; 运用Microsoft Excel 2016和SPSS 26.0软件进行数据整理和统计分析; 采用R语言对数据进行可视化处理, 评估土壤速效养分含量与土壤碳氮磷循环相关生物化学功能指标的相关性。

2 结果与分析

2.1 玉米产量

由图1可知, 间作模式填埋秸秆能有效提高玉米产量, 其中, M-P和M-S这2种间作模式的玉米产量显著高于玉米单作的; 在填埋秸秆的处理中, M-S和M-P玉米产量较玉米单作的分别增加了44.4%、61.3%; 在相同种植模式下, 填埋秸秆处理的玉米

产量均高于未填埋秸秆的。由此可见,间作模式搭配秸秆填埋可以有效提高玉米产量。



图柱上不同小写字母表示相同处理不同种植模式间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图1 4种植植模式下的玉米产量

Fig.1 Corn yields from the four cropping patterns

2.2 土壤养分变化

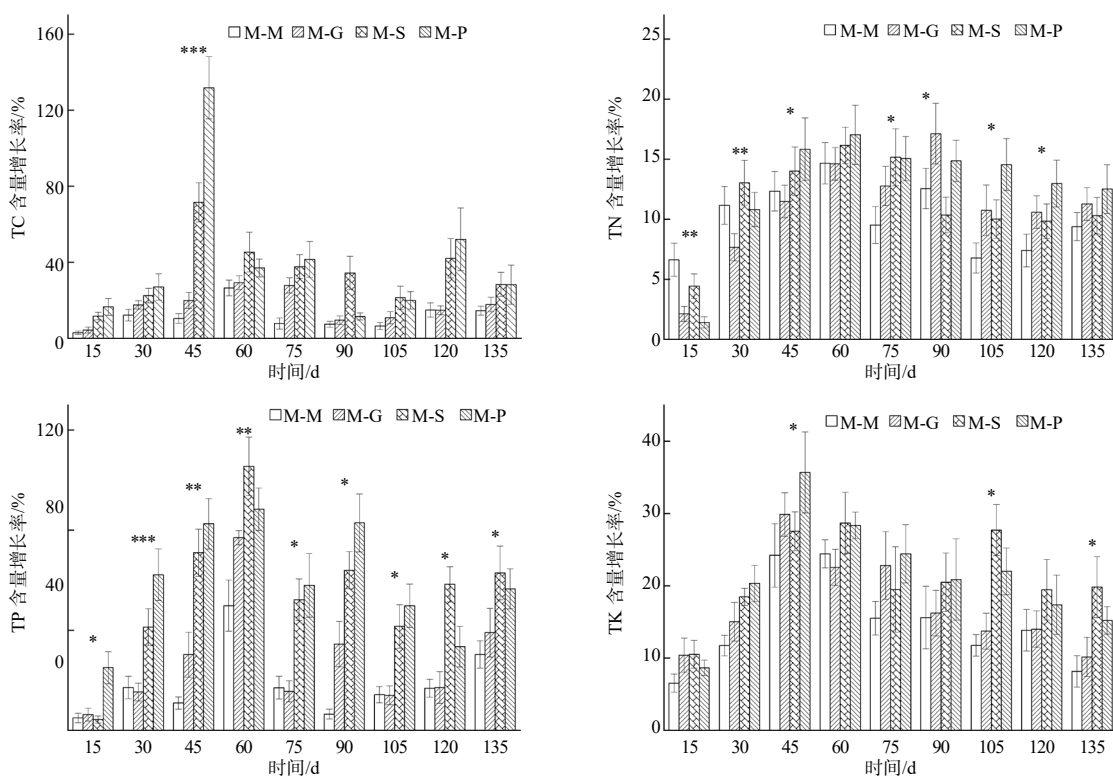
2.2.1 土壤全量养分变化

由图2可知,与未填埋秸秆处理相比,填埋秸秆的单作和间作均增加了土壤中的养分含量,且多数时间下间作模式的土壤全量养分含量增长率大

于单作的;由秸秆填埋后土壤中的全量养分含量总体增长趋势可以看出,45~90 d时土壤养分含量增幅较大,且多数时期M-P、M-S、M-G、M-M的土壤养分含量增长率依次降低。在45 d时, M-P的土壤TC含量增长率明显高于其他3种植植模式的;除15~45 d和90 d时外,间作的TN含量增长率均高于单作的;除15 d时外, M-P和M-S的TP含量增长率均明显高于M-M的;间作的土壤TK含量增长率均高于单作的(60 d时M-G的除外)。9次取样中土壤TC含量最高增长率为134.6%,土壤TN含量最高增长率为17.03%,土壤TP含量最高增长率为107.6%,土壤TK含量最高增长率为36.3%。

2.2.2 土壤速效养分变化

由图3可知,与未填埋秸秆处理相比,填埋秸秆处理均增加了土壤速效养分含量,且多数时间下间作模式的土壤速效养分含量增长率大于单作的。其中,60 d时土壤速效养分含量增幅最明显,且除AK外M-P的土壤速效养分含量增长率最大,这说明



*, **, ***分别表示同一时间内4种植植模式间的差异有统计学意义($P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$)。

图2 同一时间和种植模式下填埋秸秆处理的土壤养分含量较未填埋秸秆处理的增长率

Fig.2 The increase rates of soil nutrient contents in the straw burial treatment compared with the non-straw burial treatment under the same time and planting pattern

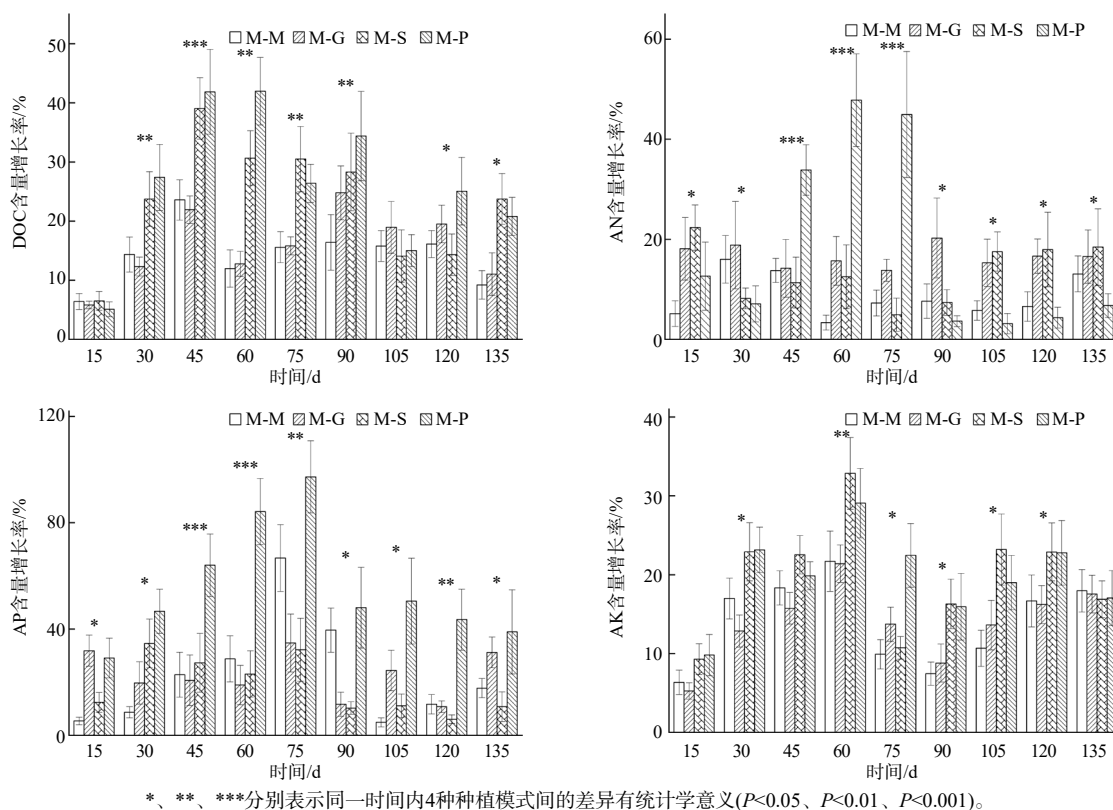


图3 同一时间和种植模式下填埋秸秆处理的土壤速效养分含量较未填埋秸秆处理的增长率

Fig.3 The increase rates of soil available nutrient contents in the straw burial treatment compared with the non-straw burial treatment under the same time and planting pattern

秸秆腐解后能够提高土壤中速效养分含量,且间作模式的提升效果更好。45、60 d时, M-S和M-P的土壤DOC含量增长率均明显高于单作模式的,且45 d时M-S和M-P的最高增长率分别为39.1%和41.9%; 45~75 d时, M-P的土壤AN、AP含量增长率均明显高于其他模式的,最高分别达47.7%和97.8%;在60 d时, M-S土壤AK含量提升最明显,增长率为32.8%。

2.3 土壤微生物量及微生物养分利用效率化学计量比的变化

由图4可知,与未填埋秸秆处理相比,填埋秸秆处理均能增加土壤微生物量,多数时期间作模式的土壤微生物量高于单作模式的。其中,秸秆填埋后30~45 d时,土壤MBC含量迅速增长,45 d时, M-P土壤MBC含量增长率最高,达47.3%;土壤MBN含量增长率随时间的延长呈先增加再降低最后又增加的趋势,且在135 d时达到峰值,此时M-P的MBN含量增长率为48.9%;45 d时, M-S和M-P的土壤MBP含量增长率均较高,分别为42.8%和38.4%。

由图4还可知,与未填埋秸秆处理相比,间作

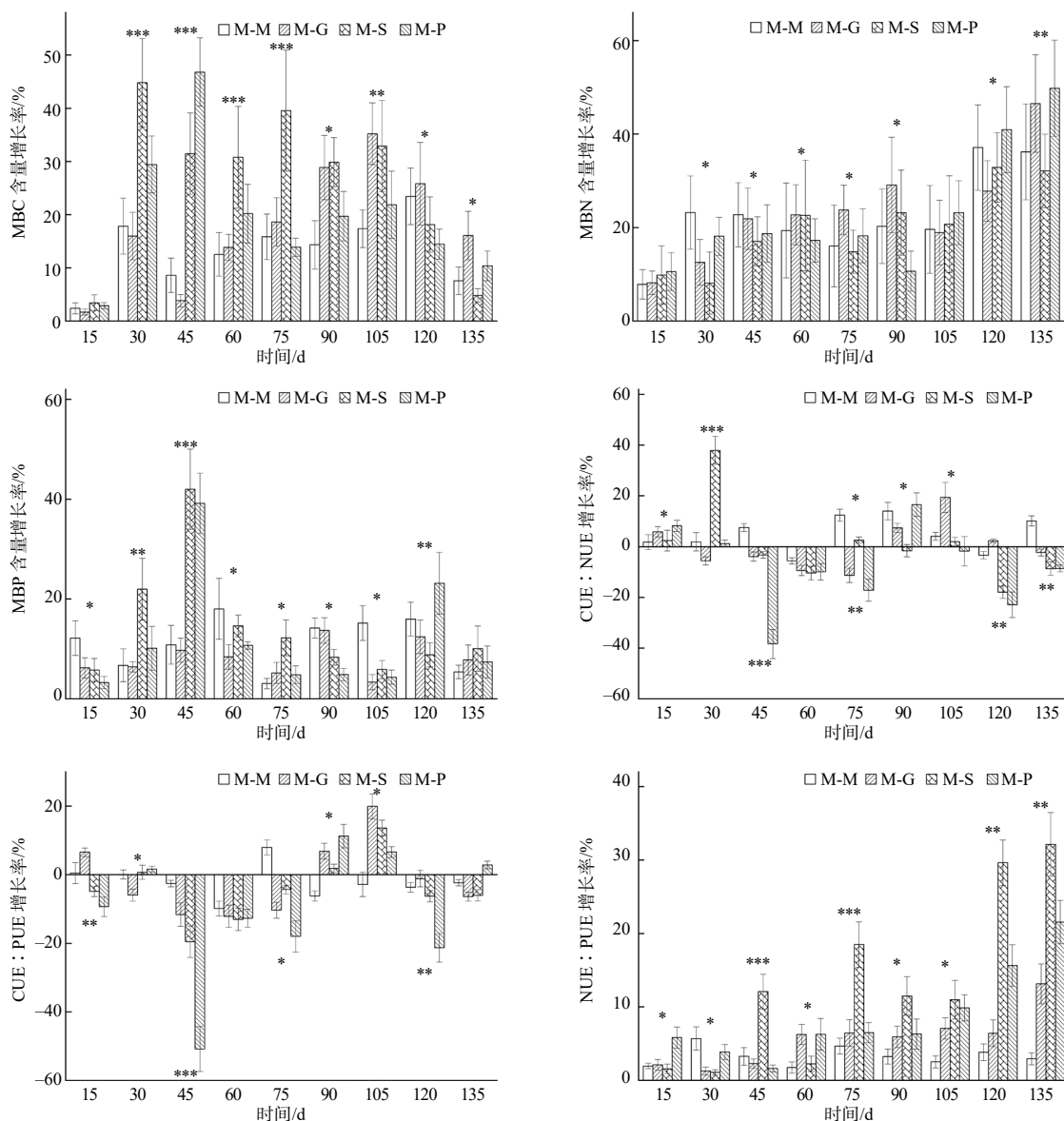
模式下填埋秸秆处理的CUE : NUE、CUE : PUE、NUE : PUE呈现出明显的时间动态差异,且在各时间点的CUE : NUE、CUE : PUE以减小为主, NUE : PUE则均增大。其中,45 d时,不同模式间CUE : NUE、CUE : PUE增长率差异极显著, M-P的CUE : NUE、CUE : PUE负增长率分别为37.6%、50.8%;30 d时M-S的CUE : NUE增长率最高,为37.9%;60 d时M-S和M-P的CUE : NUE负增长率分别为10.4%和9.9%;15~30 d时, CUE : PUE变化并不明显;105 d时,玉米间作的CUE : PUE增长率均高于玉米单作的;120~135 d时,间作模式的NUE : PUE增长率高于其他时期的,且135 d时, M-S的NUE : PUE增长率为32.1%,明显高于其他模式的。

2.4 土壤碳氮磷获取酶活性的变化

从图5可知,与未填埋秸秆的处理相比,秸秆填埋45 d时, M-S的AG活性的增长率为9.7%,明显高于M-M的;120 d时, M-S的BG活性的增长率为28.0%;30 d时, M-P的BX活性的增长率为48.9%,明显高于M-M的;75 d时, M-S的CBH活性的增长率为35.4%,明显高于M-M的;105 d时, M-P的SP

活性的增长率为38.9%，极显著高于M-M的；105 d时，M-S的Ure活性的增长率为95.2%，极显著高于M-M的；60 d时，M-P的LAP活性的增长率为53.6%，显著高于M-M的；30 d时，M-S的NAG活性的增长率为22.2%，明显高于M-M的；45 d时M-S的ACP活性的增长率为59.3%，明显高于M-M的；30 d时，M-P的ALP活性的增长率为88.7%，极显著高于M-M的。这说明多数时期下间作M-S和M-P的酶活性明显高于单作的。

从图6可知，填埋秸秆处理的土壤获取酶的潜在活性均高于未填埋秸秆处理的。在60 d时，间作处理的C-acq的增长率均高于单作处理的；而在15 d时M-S与M-P的N-acq的增长率明显高于M-M的，分别为41.7%和36.2%；M-P与M-S的P-acq的增长率均高于M-M的(105 d时M-S的除外)。在不同时期取样中，60 d时M-G的C-acq增长率最高，为55.8%；75 d时M-S的N-acq增长率最高，为50.6%；75 d时M-P的P-acq增长率最高，为24.3%。



*、**、***分别表示同一时间内4种植模式间的差异有统计学意义($P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$)。

图4 同一时间和种植模式下填埋秸秆处理的土壤微生物量和微生物利用效率化学计量比较未填埋秸秆处理的增长率

Fig.4 The increase rates of soil microbial biomass and microbial utilization efficiency stoichiometry in the straw burial treatment compared with the non-straw burial treatment under the same time and planting pattern

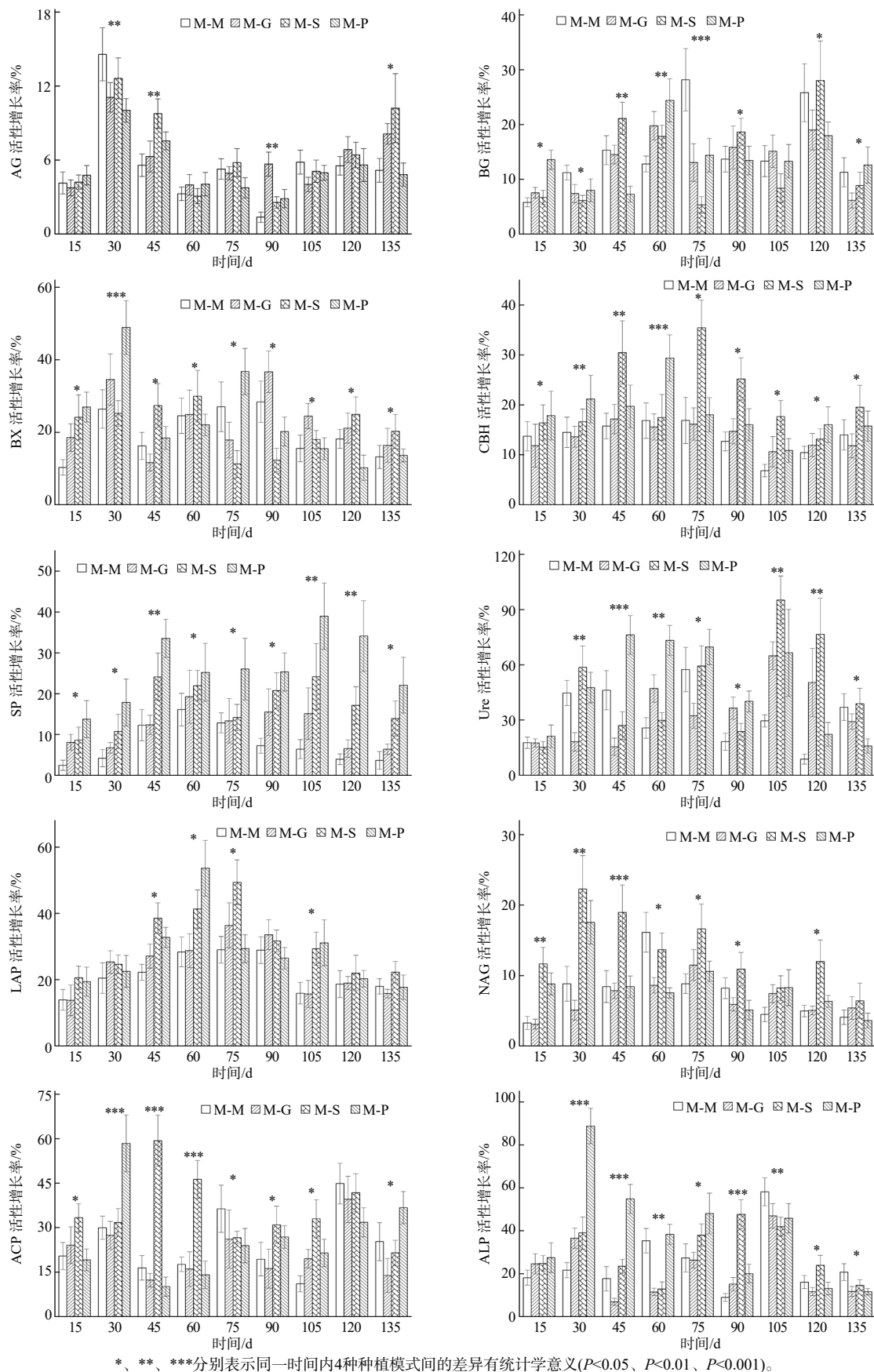
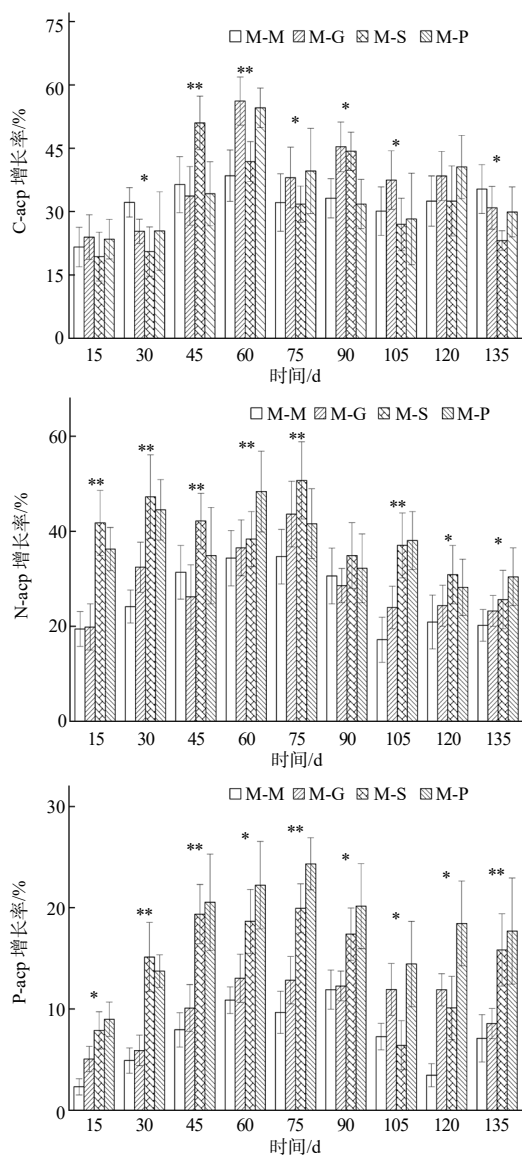


图5 同一时间和种植模式下填埋秸秆处理的土壤碳氮磷获取酶活性较未填埋秸秆处理的增长率

Fig.5 The increase rates of soil carbon, nitrogen, and phosphorus acquisition enzyme activities in the straw burial treatment compared with the non-straw burial treatment under the same time and planting pattern



*, **分别表示同一时间内4种植植模式间的差异有统计学意义 ($P < 0.05$, $P < 0.01$)。

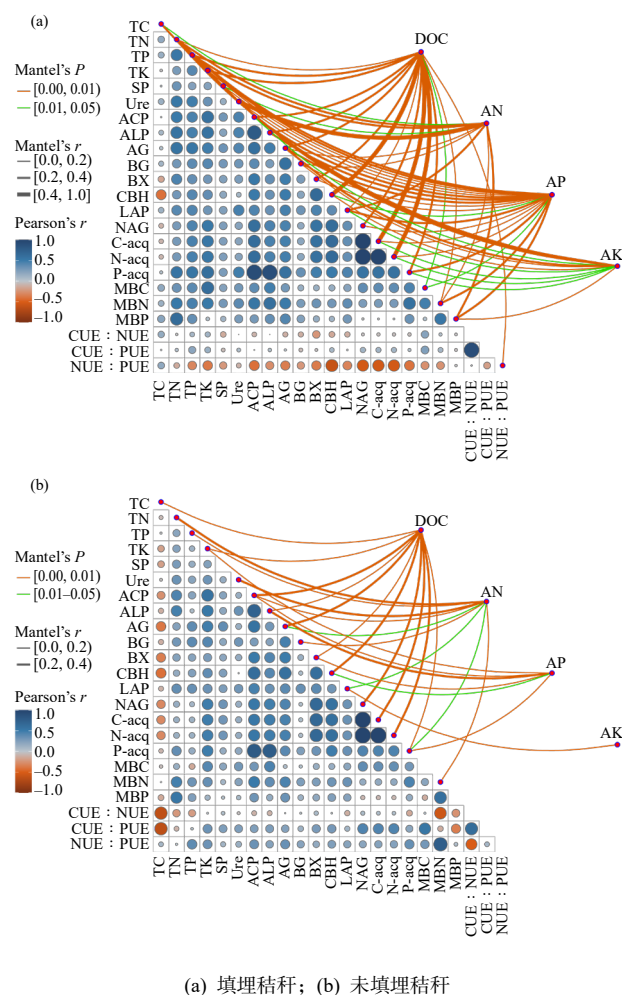
图6 同一时间和种植模式下埋埋秸秆处理土壤碳氮磷获取酶活性几何平均值较未埋埋秸秆处理的增长率

Fig.6 The increase rates of geometric means of soil carbon, nitrogen, and phosphorus acquisition enzyme activities in the straw burial treatment compared with the non-straw burial treatment under the same time and planting pattern

2.5 土壤速效养分含量与土壤碳氮磷循环相关生物化学功能指标的相关性

从图7(a)可知, 埋埋秸秆下速效养分DOC含量与TN、TP、TK、MBN、MBP含量和ACP、ALP、AG、BG、BX、CBH、LAP、NAG活性及P-acq、N-acq、C-acq、NUE : PUE呈极显著正相关, 与MBC含量呈显著正相关; AN含量与TN、TP、MBN、MBP含量和Ure、AG、BG、LAP活性呈极显著正相关, 与TC含量和SP活性呈显著正相关; AP含量与

TN、TP、TK、MBN、MBP含量和SP、Ure、ACP、ALP、AG、BG、BX、LAP、NAG活性及P-acq、N-acq、C-acq呈极显著正相关, 与MBC含量和CBH活性呈显著正相关; AK与TC、TN、MBP含量及AG、BG、CBH活性呈极显著正相关, 与ACP、LAP活性及P-acq、N-acq、C-acq呈显著正相关。从图7(b)可知, 与埋埋秸秆处理相比, 未埋埋秸秆处理的速效养分与各指标间的相关性明显降低。其中, DOC含量与TC、TK含量和ACP、ALP、AG、BX、CBH、NAG活性及P-acq、N-acq、C-acq呈极显著正相关; AN与TN、TP、MBN含量及Ure、ACP、BG活性呈极显著正相关, 与AG、LAP活性及P-acq呈显著正相关; AP含量与TK含量和ACP、ALP、BX活性及P-acq呈极显著正相关, 与CBH活性呈显著正相关;



(a) 埋埋秸秆; (b) 未埋埋秸秆

图7 有埋埋秸秆处理下土壤速效养分含量与土壤碳氮磷循环相关生物化学功能指标的相关性

Fig.7 Correlation between soil available nutrient contents and biochemical functional indicators for soil carbon, nitrogen, and phosphorus cycling under straw burial and non-straw burial treatments

AK含量仅与LAP呈极显著正相关。由此可见, 秸秆填埋显著加强了土壤速效养分(DOC、AK、AP、AN)与土壤全量养分、微生物量、微生物养分利用率化学计量比及碳氮磷获取酶活性的相关性。

3 讨论

研究表明, 与单作相比, 间作模式有利于促进作物增产^[17], 提高土壤养分有效性^[18]。本研究中, 与单作相比, 玉米与大豆或花生间作模式下的玉米产量显著增加, 且多数时间下间作模式的土壤养分含量增长率大于单作的, 其结论基本相符。

POORMANSOUR等^[19]研究表明, 秸秆还田可以提高土壤养分含量和土壤供肥培肥能力。本研究结果表明, 间作模式与秸秆填埋的协同作用能够有效提高玉米产量, 相同种植模式下填埋秸秆的玉米产量均高于未填埋秸秆的; 此外, 间作模式与秸秆填埋的协同作用能够进一步提高土壤速效养分含量, 促进作物对养分的吸收。这说明间作模式耦合秸秆填埋能够进一步提高作物产量与土壤养分的有效性。

土壤酶在土壤新陈代谢的过程中发挥着不可或缺的作用^[20], 是反映土壤质量和养分转换效率等特征的关键指标^[21]。刘均霞等^[22]研究表明, 玉米大豆间作的土壤酶活性显著高于单作的, 而秸秆填埋有助于促进微生物量的增长并促进土壤酶活性的增加。本研究中, 秸秆腐解促使微生物量的增加, 进而促进土壤酶活的增强, 且玉米-大豆间作处理的氮获取酶活性增强效果最为明显, 这可能是因为玉米生长过程中对氮素的营养需求较高, 玉米与大豆间作体系中二者存在氮素竞争关系, 玉米的氮素竞争优势刺激了大豆根瘤菌的固氮^[23]。

刘晗等^[24]研究发现, 土壤微生物量因土壤养分的增加而增加, 这进一步增强了土壤相关酶的活性。根系释放的有效底物可能刺激根际微生物的生长, 导致细胞外酶的增加, 促进秸秆的腐解响应释放^[25]。本研究中, 多数时期M-P和M-S的土壤碳氮磷获取酶活性明显高于M-M的, 这可能是由于间作模式下的填埋秸秆增加了根际土壤养分含量, 在促

进作物生长发育的同时, 提升根际微生物群落的活性和代谢能力, 进而提高了土壤相关酶的活性。

有研究^[26]指出, 秸秆填埋和间作模式搭配可丰富土壤养分库, 调节土壤化学计量比, 缓解土壤微生物资源约束, 为微生物生长和繁殖提供足够的能量和资源。本研究中, 与未填埋秸秆处理相比, 填埋秸秆处理均能增加土壤微生物量, 且微生物量在秸秆填满30~60 d时增长较快, 同时, 多数时期间作模式的土壤微生物量高于间作模式的。这表明间作模式下的秸秆填埋可以有效增加土壤微生物量库。

此外, 秸秆腐解后产生额外的碳和养分, 刺激了微生物矿化、固定化和土壤呼吸过程, 并影响土壤有机质动态和养分储备, 进而改变微生物养分利用效率^[27]。如CUE的增加可促进土壤中潜在的碳储存^[28], 在有机物分解过程中, 微生物的代谢控制可能从碳限制转变为氮限制^[29]。本研究中, 秸秆填埋和间作模式搭配下, CUE : NUE、CUE : PUE、NUE : PUE呈现出明显的时间动态差异, 且与未填埋秸秆的处理相比, 各时间点的CUE : NUE、CUE : PUE以减小为主, NUE : PUE则均增大。这可能是因为秸秆填埋中碳的输入导致碳过剩, 进而使CUE下降, 相比碳, 秸秆填埋氮磷的输入量可能不足, 氮磷养分稀缺会导致微生物优先提高氮、磷的利用率, 进而导致CUE : NUE、CUE : PUE下降。从NUE : PUE的增长趋势可知, 间作模式下秸秆填埋导致NUE的提升幅度大于PUE的。

有研究^[30]表明, 土壤中微生物群落结构的增加和土壤酶活性提升是促进作物养分吸收的重要基础^[31]。秸秆的投入给土壤提供了充足的物质和能量来源, 可供微生物活动和繁殖, 并增加土壤微生物总量和生物活性^[32]。同时秸秆还田可直接提供有机碳, 土壤微生物能将这些有机质转化为可供作物利用的养分^[33]。土壤酶活性和营养微生物种群对作物养分吸收的积极影响, 本质上也源于这一过程中土壤养分供应的充足性^[34], 而秸秆填埋本身也能促进土壤微生物种群的生长, 加速有机养分的矿化和无机营养物的溶解, 为作物获取养分提供助力^[35]。本研究结果显示, 秸秆填埋和间作模式搭配促进了作

物对养分的吸收和利用,可能与土壤微生物量及土壤酶活性的提升密切相关。此外,作物从土壤环境中获取养分的过程在很大程度上依赖于土壤碳和氮的有效性^[36],间作模式联合秸秆添加,通过改善微生物群落和微生物组碳,增强土壤氮循环酶活性,最终促进植物对残留氮的吸收。综上可知,间作模式与秸秆填埋搭配,可通过增加土壤酶活性和微生物量,优化碳氮循环与养分有效性,最终更高效地促进作物对养分的吸收。

4 结论

本研究中,间作模式与秸秆填埋的协同作用能够提高土壤肥力、土壤微生物量和酶活性,从而提高作物对养分的吸收,促进玉米增产。其中,玉米-大豆和玉米-花生这2种间作模式对土壤的改善效果更优。由此可见,间作模式耦合秸秆还田是提高土壤肥力和作物产量的有效手段。

参考文献:

- [1] 李萍,希仁古力·库迪热提,周燕,等.测土配方施肥对玉米产量和养分利用率的影响[J].现代农业科技,2024(2):17-19.
- [2] 王彩花.玉米间作大豆高产优质栽培技术探究[J].农业开发与装备,2023(3):173-174.
- [3] 付再超.玉米大豆间作套种增产增效种植技术的有效推广和应用[J].种子世界,2024(11):18-20.
- [4] LI J, ZHOU L J, LIN W F. Calla lily intercropping in rubber tree plantations changes the nutrient content, microbial abundance, and enzyme activity of both rhizosphere and non-rhizosphere soil and calla lily growth[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 132: 344-351.
- [5] 马智鸣,潘增柔,杨欢,等.玉米-大豆带状套作对土壤肥力的影响[J].四川农业大学学报,2024,42(5):1028-1035.
- [6] 孙园园,张桥,孙永健,等.秸秆还田与水氮管理对水稻氮素利用及土壤理化性质的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(1):65-74.
- [7] 徐曼,陶玉田,孙静.浅谈不同栽培管理因素对玉米生长发育和产量的影响[J].现代化农业,2024(11):24-26.
- [8] 岳高红,黄业昌,高锡腾,等.甜玉米/鲜食大豆间作对根际固氮细菌和丛枝菌根真菌的影响[J].玉米科学,2024,32(5):67-77.
- [9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [10] 王曼,姜永孟,张世良,等.树种混交对侵蚀退化地马尾松林土壤酶活性和碳利用效率的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):264-272.
- [11] 张尧,陈岚,王洁莹,等.太白山不同海拔森林根际土壤微生物碳利用效率差异性及其影响因素[J].植物生态学报,2023,47(2):275-288.
- [12] 刘东海,毛庆华,邓辉,等.秸秆还田配施化肥下麦田土壤理化性质和酶活性的变化[J].湖北农业科学,2024,63(5):12-16.
- [13] 宋江琴,尹亚丽,赵文,等.青海高原黑土滩退化草地土壤微生物群落空间分异特征[J].生态环境学报,2024,33(11):1696-1707.
- [14] 王爱玲,段国琪,田时敏,等.减施氮肥对富士苹果园土壤养分及酶活性的影响[J].甘肃农业大学学报,2024,59(5):155-162.
- [15] 邵奇,吴涛,解雪峰,等.不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系[J].环境科学,2024,45(3):1665-1673.
- [16] 刘银,何露露,强薇,等.经营模式对大渡河干暖河谷黄果柑坡地果园土壤微生物生物量和酶活性的影响[J].应用与环境生物学报,2021,27(2):280-288.
- [17] FU Z D, ZHOU L, CHEN P, et al. Effects of maize-soybean relay intercropping on crop nutrient uptake and soil bacterial community[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(9): 2006-2018.
- [18] SHEN L, WANG X Y, LIU T T, et al. Border row effects on the distribution of root and soil resources in maize-soybean strip intercropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 233: 105812.
- [19] POORMANSOUR S, RAZZAGHI F, SEPASKHAH A R. Wheat straw biochar increases potassium concentration, root density, and yield of faba bean in a sandy loam soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2019, 50(15): 1799-1810.
- [20] 匡恩俊,迟凤琴,张久明,等.不同耕作方式与有机物料配施后对土壤主要特性的影响[J].土壤与作物,2019,8(4):395-404.
- [21] GAO S, DELUCA T H. Wood biochar impacts soil phosphorus dynamics and microbial communities in organically-managed croplands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 126: 144-150.
- [22] 刘均霞,陆引罡,远红伟,等.玉米、大豆间作对根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J].贵州农业科学,2007,35(2):60-61,64.

- [23] 冯国建. 轮作对大豆和玉米抗逆性提升的研究[J]. 种子科技, 2024, 42(23): 158–160.
- [24] 刘晗, 王萍, 孙鲁沅, 等. 种植冬绿肥对红壤幼龄橘园土壤微生物量碳、氮和酶活的影响[J]. 生态环境学报, 2023, 32(9): 1623–1631.
- [25] 王旭琴, 唐文睿, 倪义平, 等. 根系分泌物对根际激发效应影响的生物机制研究进展[J]. 南方农业学报, 2024, 55(10): 3096–3105.
- [26] ZHANG T T, LIU Y L, GE S Q, et al. Sugarcane/soybean intercropping with reduced nitrogen addition enhances residue-derived labile soil organic carbon and microbial network complexity in the soil during straw decomposition[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024, 23(12): 4216–4236.
- [27] 王婧, 张莉, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 177–183.
- [28] 段露露, 乔芷瑛, 袁艳红, 等. 黄土高原刺槐林土壤化学计量特征和微生物元素利用效率的季节差异[J]. 生态学报, 2024, 44(15): 6584–6596.
- [29] 白家韶, 韩雪, 张馨月, 等. 悬浊液转移方式对不同 CO₂ 浓度下麦田土壤胞外酶活性测定的影响[J]. 中国农业气象, 2024, 45(12): 1405–1416.
- [30] 贾蕴欢, 胡雯颖, 邓健, 等. 氮添加对黄土丘陵区草地土壤微生物养分限制特征的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(2): 221–232.
- [31] 邬佳宾, 秦子元, 郑和祥, 等. 黄腐酸施用对砂壤土灌溉玉米产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(12): 1272–1279.
- [32] 吴裕如, 王承, 艾亥麦提·艾麦尔江, 等. 油菜秸秆还田及氮肥减量对夏玉米生长发育及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(6): 641–648.
- [33] 王晨瑜, 贾文静, 王仕杰, 等. 不同轮作方式下秸秆还田对麦田土壤养分和碳库管理指数的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(10): 6549–6556.
- [34] LIU X D, HUO H R, ZHANG Y H, et al. Promotion of maize straw degradation rate by altering microbial community structure through the addition of soybean straw[J]. *Plant and Soil*, 2025, 512(1): 1005–1025.
- [35] 魏永侠. 高产玉米的施肥管理[J]. 农家参谋, 2021(5): 48, 66.
- [36] 赵君, 张巧仙, 郝旺林, 等. 秸秆还田与氮肥运筹对土壤矿质氮及春玉米产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(7): 248–255.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正