

木薯间作甜瓜模式对木薯生长及土壤酶活性的影响

孙彬杰¹, 姜舒雅¹, 林萱⁵, 陈璐¹, 陈文杰¹, 邹天浩¹, 宋勇^{1,2,3,4*}

1. 湖南农业大学园艺学院, 湖南长沙 410128; 2. 湖南省马铃薯工程技术研究中心, 湖南长沙 410128; 3. 园艺作物种质创新与新品种选育教育部工程研究中心, 湖南长沙 410128; 4. 蔬菜生物学湖南省重点实验室, 湖南长沙 410128; 5. 湖南湘研种业有限公司, 湖南长沙 410000

摘要: 为了研究木薯间作甜瓜模式下木薯产量、品质、光合性能及土壤酶活性的变化, 为进一步改进长沙产区木薯间作甜瓜栽培技术提供理论依据。本研究以木薯(南植 199)和甜瓜(湘甜薄脆)为试验材料, 设计以木薯单作(CK)为对照, 木薯间作甜瓜时, 以甜瓜 3 种植密度(T_1 、 T_2 、 T_3 , 株距分别为 0.5、0.7、0.9 m)为处理, 研究木薯间作甜瓜对木薯产量、品质、光合性能及土壤酶活性的影响。结果表明: 与木薯单作相比, 木薯间作甜瓜处理下, 木薯单株结薯数、干物率和淀粉含量无显著性变化, 间作提高了木薯单株产量、经济产量、可溶性蛋白和维生素 C 含量, 各处理对木薯产量与品质的影响大小依次为 $T_2 > T_3 > T_1 > CK$ 。在间作模式下, 木薯叶片的光合能力得到显著提升, 在块根形成期与膨大期木薯叶片的净光合速率(P_n)显著高于单作处理; 在块根成熟期 T_2 处理下, 木薯叶片的 P_n 显著高于其他处理, 间作处理下木薯叶片的胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)均显著高于单作处理。随着木薯植株的生长, 土壤中蔗糖酶活性表现出先降后增的趋势, 脲酶表现出先增后降的趋势, 而酸性磷酸酶和过氧化氢酶表现出逐渐下降的趋势。不同时期间作对土壤中蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶的活力有明显的促进作用, 但对脲酶活性的影响较小, 其中 T_2 处理在木薯块根膨大期与块根成熟期土壤中蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶的活力显著高于单作处理。综上所述, 与木薯单作相比, 木薯间作甜瓜模式提高了木薯光合性能及土壤肥力水平, 从而提高了木薯的经济产量和品质, 其中以 2 行木薯间作 1 行甜瓜, 甜瓜株距为 0.7 m 的栽培模式最优, 为适合长沙产区的木薯间作甜瓜模式。

关键词: 木薯; 甜瓜; 间作; 光合性能; 土壤酶活

中图分类号: S533; S652 文献标识码: A

Effects of Cassava Intercropping Melon Pattern on Cassava Growth and Soil Enzyme Activities

SUN Binjie¹, JIANG Shuya¹, LIN Xuan⁵, CHEN Lu¹, CHEN Wenjie¹, ZOU Tianhao¹, SONG Yong^{1,2,3,4*}

1. College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Potato Center of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China; 3. Engineering Research Center for Horticultural Crop Germplasm Creation and New Variety Breeding, Ministry of Education, Changsha, Hunan 410128, China; 4. Key Laboratory for Vegetable Biology of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China; 5. Hunan Xiangyan Seed Industry Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China

Abstract: In order to study the changes of cassava yield, quality, photosynthetic performance and soil enzyme activities under cassava intercropping mode of muskmelon, and to provide theoretical basis for improving the cultivation technology of cassava intercropping muskmelon in Changsha, cassava (Nanzhi 199) and muskmelon (Xiangtian thin crisp) were used as the experimental materials, cassava monoculture (CK) was used as the control, and three planting densities (T_1 , T_2 , T_3 , plant spacing of 0.5, 0.7, 0.9 m) of muskmelon in cassava intercropping were used as treatments. Compared with monoculture cassava, the number of tuber per plant, dry matter percentage and starch content of cassava were not

收稿日期 2022-08-22; 修回日期 2022-10-27

基金项目 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设项目 (No. CARS-11-HNSY)。

作者简介 孙彬杰 (1995—), 女, 硕士, 研究方向: 蔬菜栽培生理。*通信作者 (Corresponding author): 宋勇 (SONG Yong), E-mail: songyong1117@163.com。

significantly changed under intercropping treatment, but the yield per plant, economic yield, soluble protein and vitamin C content of cassava increased under intercropping treatment. The effects of each treatment on cassava yield and quality were in the order of $T_2 > T_3 > T_1 > CK$. The photosynthetic capacity of cassava leaves in intercropping mode significantly increased, and the net photosynthetic rate (P_n) of cassava leaves in root tuber formation and expansion stage was significantly higher than that of monoculture treatment. The P_n of cassava leaves under T_2 treatment was significantly higher than that under other treatments, and the intercropping treatment had significantly higher intercellular CO_2 concentration (C_i), stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r) than those under monoculture treatment. With the growth of cassava plants, the activity of sucrose in soil showed a trend of decreasing first and then increasing, urease showed a trend of increasing first and then decreasing, while acid phosphatase and catalase showed a trend of decreasing gradually. The activity of sucrose, acid phosphatase and catalase in soil was significantly promoted by intercropping at different stages, but had little effect on urease activity. The activity of sucrose, acid phosphatase and catalase in soil of T_2 treatment was significantly higher than those of monoculture treatment at the expansion and maturity stages of cassava roots. In conclusion: Compared with cassava monoculture, cassava intercropping model improved cassava photosynthetic performance and soil fertility level, so as to improve the economic yield and quality of cassava. The optimal cultivation model with two rows of cassava intercropping and one row of melon with a distance of 0.7 m was suitable for the cassava intercropping model in Changsha.

Keywords: cassava; muskmelon; intercropping; photosynthetic performance; soil enzyme activity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.10.012

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 属大戟科木薯属植物, 全球第六大粮食作物, 具有耐旱抗贫瘠、容易栽培和高产等优良特性^[1-3]。但木薯生育期较长 (8~11 个月), 初期生长缓慢, 种植密度小 (株行距约 1.0 m×1.0 m), 土地使用率低, 不能充分利用光能和土壤资源, 造成单位耕地面积产量和经济效益较低^[4], 采用木薯间作模式已成为近年来种植业发展的新趋势^[5-6]。前人多项研究结果表明, 相对于单一的传统种植模式, 间作可提高土地利用效率, 增加复种指数与提高作物产量。同时, 2 种作物还可产生互补作用, 减少肥料的投入, 降低对生态系统多样性的破坏, 减少病虫害的发生, 提高生态系统的稳定性^[6]。

甜瓜 (*Cucumis melo*) 属蔓生草本作物, 生长较快, 生育期短, 木薯与甜瓜的间作模式利用了高、矮作物的有效搭配, 不仅提高了光能利用率, 而且有效地利用了土地, 增加了复种指数, 从而提高了种植效益^[7-10]。如陈仲南^[8]在对木薯间作西瓜时发现, 间作比单作木薯每公顷增收 2.64~4.86 万元; 宋付平等^[9]在木薯间作蜜本南瓜时发现间作比单种木薯产量提高 38% 左右; 廖浩培等^[10]调查发现, 木薯套种香瓜的净收入是单作木薯的 4.7 倍。光能是植物产生有机物的能源, 其强弱将直接影响到作物的光合生理特征和干物量^[11]。有研究发现合理的密度栽培既可减少地表裸露, 提高土地利用效率, 又可改善间作群体的通风透光性,

减少种内竞争, 提高作物光能利用率, 从而实现作物高产^[12-13]。如闫庆祥等^[12]在木薯间作大豆研究中发现, 2 行木薯间作 2 行大豆的种植模式使木薯光合速率和气孔导度比单作木薯分别最大增幅为 11.4% 和 20.5%; 熊军等^[13]在木薯间作花生研究中发现, 2 行木薯间作 2 行花生的种植模式, 间作比单作木薯的光合速率增幅 2.50%~3.29%。土壤环境的好坏决定着生产力水平的高低^[14]。前人研究表明, 作物间作不仅有助于改善土壤环境, 提高生态系统稳定性, 还能够增加作物产量, 改善作物品质, 提高作物安全性^[15-16]。如苏必孟^[15]在对木薯间作花生时表明, 间作模式的木薯理论最大氮素、磷素的累积量均高于单作木薯, 间作模式中以 2 行木薯间作 4 行花生的种植模式木薯根际土的肥力最高; 唐秀梅等^[16]对木薯、花生的间作试验结果显示, 1 行木薯间作 1 行花生, 木薯与花生行距为 0.3 m 间作时, 木薯根际土壤中过氧化氢酶活力较单作木薯提高 59.20%。

可见, 合理的种植方式对提高作物的光合能力、改良土壤结构、提高土壤品质具有重要作用^[17]。因此, 本研究以木薯单作为对照, 木薯间作甜瓜时甜瓜 3 种植植密度为处理, 并对单作与间作模式下木薯产量、品质、光合性能及土壤酶活性进行测定分析, 探究木薯间作甜瓜模式下木薯产量、品质、光合性能及土壤酶活性的变化, 为改进长沙产区木薯间作甜瓜栽培技术提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材 料

木薯品种为南植 199, 由广西武鸣农技推广站提供。甜瓜品种为湘甜薄脆, 由湖南湘研种业公司提供。

试验在湖南省长沙县湘研种业试验基地进行 (28°11'N, 113°4'E), 试验田耕种前 0~20 cm 耕层土壤理化性质: pH 为 6.38, 有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 20.40、1.44、1.08、10.50 g/kg, 水解性氮、有效磷、速效钾含量分别为 115.00、40.10、88.00 mg/kg。

1.2 方 法

1.2.1 试验设计 试验共设 4 个处理, 分别为单作木薯 (CK), 木薯间作甜瓜时甜瓜的 3 种不同种植密度 (用 T₁、T₂、T₃ 表示), 采用 1.8 m 包沟起垄种植, 垄宽 1.0 m, 沟宽 0.8 m。木薯种植方式采用宽窄行种植, 木薯宽行为 1.0 m, 窄行为 0.8 m。木薯间作甜瓜处理为 2 行木薯 1 行甜瓜, 甜瓜均在垄上种植, 木薯与甜瓜之间行距均为 0.5 m, T₁ 处理的甜瓜株距为 0.5 m, T₂ 处理的甜瓜株距为 0.7 m, T₃ 处理的甜瓜株距为 0.9 m。木薯单作与间作株距均为 0.8 m。种植设计参照图 1。试验按随机区组排列, 每处理 3 次重复, 共计 12 个小区, 小区面积为 1.8 m×10 m=18 m²。木薯于 2021 年 5 月 1 日种植, 11 月 13 日收获, 整个生长周期共 197 d; 甜瓜于 2021 年 6 月 14 日播种, 每穴播 3 粒, 出苗后补苗, 间苗, 定苗, 9 月 2 日收获, 整个生长周期共 80 d。木薯与甜瓜共生长期共 80 d。

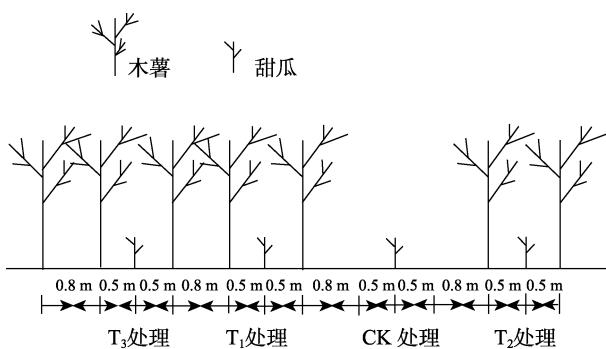


图 1 田间布置

Fig. 1 Layout of field test

1.2.2 项目测定 (1) 木薯光合性能测定。木薯种植 60 d 后, 每月每小区随机选取 5 株能代表本区平均长势的木薯, 采用 LI-6400 XT 光合仪测定

木薯功能叶的净光合速率 (P_n)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r)。

(2) 土壤酶活性测定。取土时间: 于木薯种植前 (3 月 26 日)、木薯块根形成期 (7 月 14 日)、木薯块根膨大期 (9 月 7 日)、木薯收获期 (11 月 9 日) 分别采集土样。

取样方法: 木薯单作: 在两行木薯中间进行五点交叉取样法; 间作: 在木薯与甜瓜中间进行五点交叉取样法; 每个取样点在垂直方向上取 0~20 cm 土层。样品于 37 °C 烘干箱内烘干, 烘干后分别过 40 目与 60 目筛, 供土壤酶活性的分析测定使用。

测定方法: 对土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定, 对土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 对土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定, 对土壤酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[18-19]。

(3) 木薯产量与品质测定。单株产量与单株结薯数测定: 收获时各处理随机选取 10 株木薯, 实测鲜薯块根重量与单株结薯数。

经济产量测定: 收获时各处理随机选取 10 株木薯, 实测鲜薯块根重量, 根据小区的株数折算每公顷产量。

干物率测定: 各处理称取鲜木薯块根 100 g, 将块根切碎放置 65 °C 烘干箱烘干称重, 计算其干物率。

品质测定: 对新鲜木薯可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定, 淀粉含量采用酸水解法与蒽酮比色法测定^[20], 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝染色法测定^[21], 维生素 C 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定^[22]。

1.3 数据处理

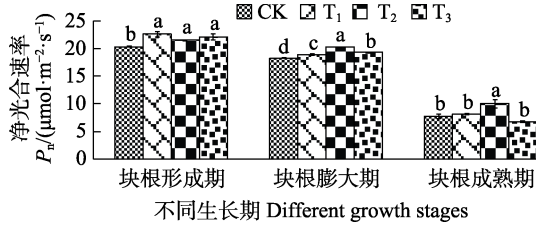
采用 Excel 2010 软件对数据进行处理和作图, 用 SPSS 软件的 ANOVA 对数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同间作模式对木薯光合特性的影响

2.1.1 不同间作模式对木薯净光合速率 (P_n) 的影响 由图 2 可知, 木薯叶片的 P_n 在块根形成期达到最大值, 间作处理下在木薯块根膨大期与块根成熟期木薯叶片的 P_n 均显著高于单作处理, 说明间作处理可提高木薯叶片的 P_n 。在块根形成期, T₁、T₂、T₃ 处理下的 P_n 分别比单作处理显著提高了 11.29%、5.90% 和 8.60%, 不同间作处理无显

著差异；在块根膨大期 T_1 、 T_2 、 T_3 处理下的 P_n 分别比单作处理显著提高了 3.80%、11.06% 和 5.90%；在块根成熟期， T_2 处理与其他处理存在显著差异。

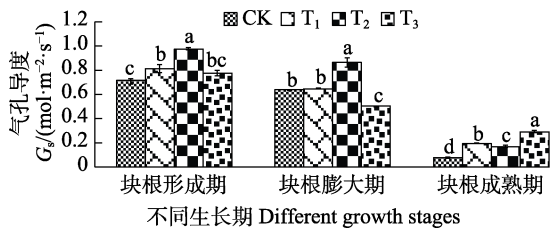


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。 Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同间作模式下的木薯净光合速率

Fig. 2 Net photosynthetic rate of cassava under different intercropping patterns

2.1.2 不同间作模式对木薯气孔导度 (G_s) 的影响 从图 3 可知，木薯叶片的 G_s 在块根形成期达到最大值。除在块根膨大期 T_3 处理下的 G_s 小于单作处理外，其余间作处理下的 G_s 值均高于单作处理。说明不同间作模式均能不同程度促进叶片木薯 G_s 的增加。块根形成期和块根膨大期 T_2 处理下的 G_s 分别比单作处理显著增加了 36.11% 和 35.93%，且 T_2 处理与其他处理存在显著差异。说明 T_2 处理下的 G_s 优于其他处理，对于木薯 CO_2 的吸收具有促进作用。



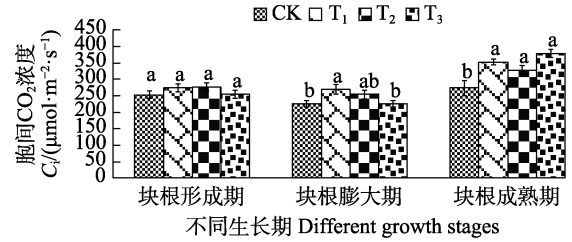
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。 Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同间作模式下的木薯气孔导度

Fig. 3 Stomatal conductance of cassava under different intercropping patterns

2.1.3 不同间作模式对木薯胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的影响 从图 4 可知，在木薯生育发展的 3 个时期，间作处理均高于单作处理。说明间作可促进木薯叶片 C_i 的增加。块根形成期，各处理无显著差异；块根膨大期， T_1 处理下的 C_i 比单作处理显著增加了 19.33%，其余处理间无显著差异；块根成熟期， T_1 、 T_2 、 T_3 处理下的 C_i 分别比单作处理

显著增加了 28.98%、20.06% 和 38.50%，不同间作处理间无显著差异。

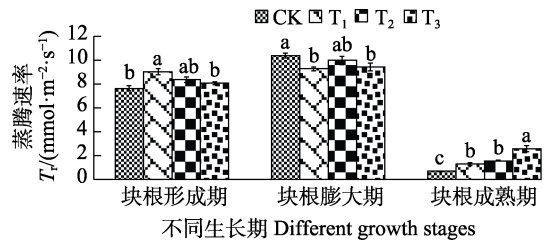


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。 Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 4 不同间作模式下的木薯胞间 CO_2 浓度

Fig. 4 Intercellular CO_2 concentration in cassava under different intercropping patterns

2.1.4 不同间作模式对木薯蒸腾速率 (T_r) 的影响 从图 5 可知，木薯叶片蒸腾速率随着生育期的进行呈现先增后降的趋势，除在木薯块根膨大期间作处理下的 T_r 低于单作处理外，其余时期间作处理下木薯叶片的蒸腾速率均高于单作处理。在块根形成期， T_1 处理下的 T_r 比单作显著增加了 18.42%，其余处理间无显著差异；在块根膨大期， T_1 和 T_3 处理下的 T_r 显著低于单作处理；在块根成熟期， T_1 、 T_2 和 T_3 处理下的 T_r 分别比单作处理显著增加了 95.38%、135.40% 和 292.30%。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。 Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

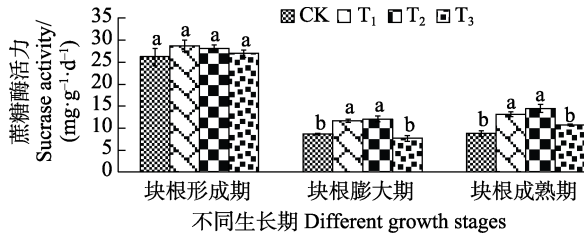
图 5 不同间作模式下的木薯蒸腾速率

Fig. 5 Transpiration rate of cassava under different intercropping patterns

2.2 不同间作模式对土壤酶活性的影响

2.2.1 不同间作模式对土壤蔗糖酶活性的影响 从图 6 可知，在木薯生育过程中蔗糖酶活性的变化呈现出先降后增的趋势， T_1 与 T_2 处理在块根膨大期和块根成熟期均显著高于单作处理，说明间作处理提高了土壤蔗糖酶活性。在块根形成期各处理间无显著差异；块根膨大期， T_1 和 T_2 处理下土壤蔗糖酶活性分别比单作处理的显著提高了

34.91%和 39.86%；在块根成熟期， T_1 、 T_2 处理下的蔗糖酶活性分别比单作处理显著提高了 49.38%和 64.36%， T_3 与单作处理无显著差异。蔗糖酶活性大致表现为 $T_2 > T_1 > T_3 > CK$ 。

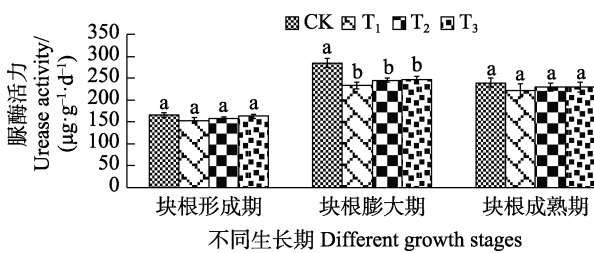


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 6 不同间作模式下的土壤蔗糖酶活性

Fig. 6 Soil sucrase activity under different intercropping patterns

2.2.2 不同间作模式对土壤脲酶活性的影响 土壤脲酶与尿素氮肥水解密切相关。从图 7 可知，在木薯生育过程中土壤脲酶活性呈现先增后降的趋势。不同时期间作处理下土壤脲酶活性均低于单作处理。在块根形成期和块根成熟期间作与单作处理无显著差异；在块根膨大期，间作处理均显著低于单作处理， T_1 、 T_2 和 T_3 处理下的脲酶活性分别比单作处理显著降低了 18.06%、13.75%和 13.58%，不同间作处理间无显著差异。



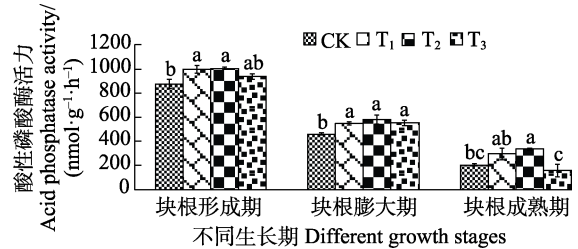
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 7 不同间作模式下的土壤脲酶活性

Fig. 7 Soil urease activity under different intercropping patterns

2.2.3 不同间作模式对土壤酸性磷酸酶活性的影响 从图 8 可知，在木薯生育过程中土壤酸性磷酸酶活性表现出逐渐降低的趋势。间作处理下在木薯块根膨大期与块根成熟期土壤酸性磷酸酶活性均高于单作处理，说明间作处理可提高土壤酸性磷酸酶活性。酸性磷酸酶活性大致表现为 $T_2 > T_1 > T_3 > CK$ 。在块根形成期， T_1 、 T_2 处理下的

酸性磷酸酶活性分别比单作处理显著提高了 14.41%、15.06%， T_3 处理与单作处理无显著差异；块根膨大期，间作与单作处理差异显著，不同间作处理间无显著差异；块根成熟期， T_1 、 T_2 处理分别比单作处理显著提高了 45.43%和 63.82%， T_3 与单作处理无显著差异。



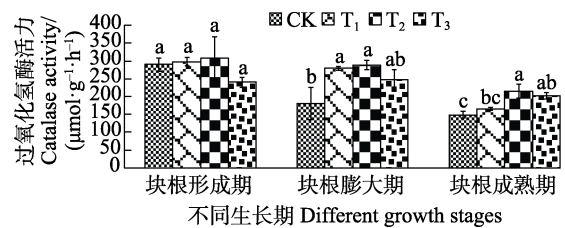
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 8 不同间作模式下的土壤酸性磷酸酶活性

Fig. 8 Soil acid phosphatase activity under different intercropping patterns

2.2.4 不同间作模式对土壤过氧化氢酶活性的影响 从图 9 可知，间作处理下在木薯块根膨大期与块根成熟期土壤过氧化氢酶活性均高于单作处理，说明间作处理可提高土壤过氧化氢酶活性。在块根形成期，各处理间无显著差异；在块根膨大期， T_1 和 T_2 处理下的过氧化氢酶活性分别比单作处理显著提高了 54.60%和 60.16%， T_3 与单作处理无显著差异；在块根成熟期， T_2 和 T_3 处理分别比单作处理显著提高了 44.26%和 35.25%， T_1 与单作处理无显著差异。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 9 不同间作模式下的土壤过氧化氢酶活性

Fig. 9 Soil catalase activity under different intercropping patterns

2.3 不同间作模式对木薯产量与品质影响

2.3.1 不同间作模式对木薯产量的影响 由表 1 可知，单作与间作条件下木薯单株结薯数差异不显著，间作处理木薯单株产量和经济产量显著高

于单作处理,其中 T₂ 处理木薯单株产量比单作处理显著提高了 20.41%,不同间作处理间无显著差异。说明间作甜瓜对木薯单株结薯数无影响,但显著提高了木薯单株产量,从而提高木薯经济产量。

表 1 不同间作模式下的木薯产量

Tab. 1 Cassava yield under different intercropping patterns

处理 Treatment	单株结薯数 Number of tubers per plant	单株产量 Yield per plant/kg	经济产量 Economic yield/(kg·hm ⁻²)
CK	7.33±0.67 ^a	1.96±0.04 ^b	26 151.60±523.47 ^b
T ₁	8.66±0.33 ^a	2.17±0.01 ^a	28 948.80±160.09 ^a
T ₂	8.33±0.33 ^a	2.36±0.08 ^a	31 479.60±1024.09 ^a
T ₃	8.33±0.33 ^a	2.23±0.08 ^a	29 748.00±1024.09 ^a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3.2 不同间作模式对木薯品质的影响 由表 2 可知,单作与间作条件下木薯块根中干物率和淀粉含量差异不显著,间作处理木薯块根中可溶性蛋白和维生素 C 含量均高于单作处理,其中 T₂ 处理木薯块根中可溶性蛋白和维生素 C 含量比单作处理显著提高了 36.30%和 14.87%。说明间作甜瓜对木薯块根中干物率和淀粉含量无影响,但提高了木薯块根中可溶性蛋白和维生素 C 的含量。

表 2 不同间作模式下的木薯品质

Tab. 2 Cassava quality under different intercropping patterns

处理 Treatment	干物率 Dry matter percentage/%	淀粉 Starch/ (mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白 Soluble protein/ (mg·g ⁻¹)	维生素 C Vitamin C/ (μg·g ⁻¹)
CK	41.49±0.64 ^a	297.19±8.89 ^a	1.35±0.04 ^b	412.72±11.73 ^b
T ₁	40.36±0.88 ^a	296.48±6.23 ^a	1.49±0.03 ^{ab}	452.42±10.74 ^a
T ₂	42.51±0.87 ^a	298.00±1.54 ^a	1.84±0.24 ^a	474.09±3.88 ^a
T ₃	40.93±0.65 ^a	296.74±8.11 ^a	1.53±0.03 ^{ab}	460.68±12.96 ^a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

3 讨论

3.1 木薯间作甜瓜对木薯光合性能的影响

光能是植物产生有机物的能源,其强弱将直接影响到作物的光合生理特征和干物量,因此,增加作物的光能利用率是提高作物产量的根本措施^[11]。本研究结果表明:木薯甜瓜间作,在木薯

生长发育过程中,除块根膨大期间作处理下的蒸腾速率比单作处理有所下降外,其余时期间作都不同程度地提高了木薯叶片的净光合速率、胞间 CO₂ 浓度和气孔导度。这与闫庆祥等^[12]的研究结果基本一致。这是由于间作处理下根系互作改善了土壤微生态,提高了土壤疏松度,促进植物根的呼吸能力^[23],同时甜瓜枝蔓腐烂后又可增加土壤养分含量,木薯根系可以更多地吸收土壤中的水分、有机质及矿质营养等,使木薯地上部生长旺盛,捕获更多光能,提高木薯的光能利用率,增加木薯经济产量。在间作中以 T₂ 模式增加最为明显,这是由于合理的栽培密度既可减少地表裸露,提高土地利用率,又可改善间作群体的通风透光性,减少种内竞争,提高光能利用率,从而实现作物高产。

3.2 木薯间作甜瓜对土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤的组成成分之一,主要来源于土壤中动植物残体的分解物以及微生物的细胞分泌物,在土壤有机质矿化和元素循环中起重要作用^[24]。前人研究表明,作物间作有助于改善土壤酶种类的组成,对土壤酶活性的提高具有重要意义^[16]。在土壤中,蔗糖酶对增加土壤中易溶性营养物质起着重要作用;过氧化氢酶能加速过氧化氢的降解,并能有效地阻止其对植物的毒性^[25]。研究结果显示,在整个生育期,间作可促进蔗糖酶和过氧化氢酶活力的增加,并与张洪勇^[26]的研究结果相吻合。这是由于蔗糖酶和过氧化氢酶与土壤有机质、全氮和速效钾等肥力因素呈现显著的正相关关系^[27-28],在木薯块根形成期与块根膨大期,植株营养生长与生殖生长旺盛,需要吸收土壤中大量营养元素,导致土壤蔗糖酶和过氧化氢酶活性的下降,木薯甜瓜间作时根系互作可促进微生物的形成^[19],改善土壤理化性质,后期甜瓜枝蔓的腐化又可增加土壤中有有机物质,提高土壤肥力水平和熟化程度,使蔗糖酶和过氧化氢酶活性提高。土壤酸性磷酸酶能够催化土壤中有机磷的降解,对土壤中有机磷农药的降解具有重要意义^[29]。本研究结果表明:在整个试验过程中土壤中酸性磷酸酶活性呈一直下降的趋势,这与张伟伟^[25]的研究结果不一致。间作处理提高了酸性磷酸酶活性,在块根膨大期,间作与单作处理差异显著,这与唐秀梅等^[16]的研究结果一致。其原因可能是由于间作种类不同,根系分泌物质也不

相同,木薯甜瓜间作时根系分泌物随着植株的生长逐渐积累,导致土壤 pH 升高,使酸性磷酸酶活性呈一直下降的趋势,但间作处理可提高土壤疏松度,使土壤微生物活动频繁^[30],酸性磷酸酶活性升高。本研究发现,土壤脲酶与尿素氮肥水解密切相关。间作降低了土壤脲酶活性,在块根膨大期间作处理显著低于单作处理,这与前人研究结果不一致^[19, 26]。可能是由于间作处理下根系间存在交错叠加作用,根系分泌物十分丰富^[27],互作分泌的物质抑制了脲酶活性,使间作处理下的脲酶活性低于单作处理,具体原因还有待进一步研究。

3.3 木薯间作甜瓜对木薯产量与品质的影响

作物产量与品质除受遗传因素影响之外,还与光照、温度、湿度等自然因素以及施肥量、栽培模式密切相关^[31]。本研究结果表明:间作显著提高了木薯单株产量, T_2 处理下木薯单株产量比单作显著提高 20.14%,这与宋付平等^[9]、廖浩培等^[10]的研究结果一致。植物可溶性蛋白富含多种氨基酸,具有很好的保健及药用价值^[32];维生素是人类生长发育所必需的微量有机物质,对人类健康具有重要意义^[33]。与单作相比, T_2 处理下木薯块根中可溶性蛋白和维生素 C 含量显著提高了 36.30%和 14.87%。说明木薯间作甜瓜处理对于提高木薯经济产量与品质有一定的促进作用。分析其原因可能是木薯前期生长缓慢,种植稀疏,易造成地表肥力流失,甜瓜属蔓生草本作物,前期与木薯间作可保护地表,减少土壤养分的淋失浪费^[30],提高土壤生态系统的稳定性^[34],后期甜瓜枝蔓腐烂,则可以使土壤中的有机质含量增加,从而增强土壤的肥力^[4],对作物的生长有一定的促进作用。间作处理下木薯经济产量与品质随甜瓜种植密度的增加呈现出先增后降的趋势,以 T_2 种植密度为最优。这与罗亚红等^[7]、陈仲南^[8]的研究结果一致,其原因是合理的间作密度可调节种内竞争关系,充分利用光照、肥量等自然因素以实现作物高产。

4 结论

综上所述,与木薯单作相比,木薯间作甜瓜模式提高了木薯光合性能及土壤肥力水平,从而提高了木薯的经济产量和品质,其中以 2 行木薯间作 1 行甜瓜,甜瓜株距为 0.7 m 的栽培模式最优,其为适合长沙产区的木薯间作甜瓜模式。

参考文献

- [1] 张箭. 木薯发展史初论[J]. 中国农史, 2011, 30(2): 19-30.
ZHANG J. A preliminary discussion on history of cassavas development[J]. Agricultural History of China, 2011, 30(2): 19-30. (in Chinese)
- [2] 王林. 淀粉的糊化与凝胶特性及食用品质研究[J]. 保鲜与加工, 2021(2): 67-73.
WANG L. Study on gelatinization and gelation characteristics of starches and their edible qualities[J]. Storage and Process, 2021(2): 67-73. (in Chinese)
- [3] BRADBURY J H, HOLLOWAY W D. Chemistry of tropical root crops: significance for nutrition and agriculture in the Pacific[M]. Canberra: Australian Centre for International Research, 1988: 76-104.
- [4] 曾文丹, 严华兵, 谢向誉, 陈仲南, 陆柳英. 木薯间作套种不同作物栽培模式及经济效益研究概况[J]. 农学学报, 2016, 6(12): 11-15.
ZENG W D, YAN H B, XIE X Y, CHEN Z N, LIU L Y. Cassava: different intercropping cultivation modes and economic efficiency[J]. Journal of Agriculture, 2016, 6(12): 11-15. (in Chinese)
- [5] 王一帆, 殷文, 胡发龙, 范虹, 樊志龙, 赵财, 于爱忠, 柴强. 间作小麦光合性能对地上地下互作强度的响应[J]. 作物学报, 2021, 47(5): 929-941.
WANG Y F, YIN W, HU F L, FAN H, FAN Z L, ZHAO C, YU A Z, CHAI Q. Response of photosynthetic performance of intercropped wheat to interaction intensity between above- and below ground[J]. Journal of Crops, 2021, 47(5): 929-941. (in Chinese)
- [6] 王雅梅. 玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性和水分利用效率的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
WANG Y M. Effects of maize-soybean intercropping with different width on photosynthetic characteristics and water use efficiency of soybean[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese)
- [7] 罗亚红, 杨龙, 罗春芳, 饶萍, 欧珍贵. 不同间作方式和种植密度对木薯产量及效益的影响[J]. 热带农业科学, 2022, 42(1): 22-26.
LUO Y H, YANG L, LUO C F, RAO P, OU Z G. Effects of different intercropping methods and planting densities on cassava yield and benefit[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2022, 42(1): 22-26. (in Chinese)
- [8] 陈仲南. 木薯间种西瓜高产高效栽培技术[J]. 中国蔬菜, 2009(11): 42-43, 3.
CHEN Z N. High yield and high efficiency cultivation technique of cassava interplanting watermelon[J]. China Vegetables, 2009(11): 42-43, 3. (in Chinese)
- [9] 宋付平, 覃新导, 冯朝阳, 李静, 李志阳, 郑永清. 木薯间

- 作蜜本南瓜高效立体种植技术[J]. 广东农业科学, 2011, 38(24): 16-17.
- SONG F P, QIN X D, FENG C Y, LI J, LI Z Y, ZHENG Y Q. Technique on using the efficient stereo planting of cassava intercropping Miben pumpkin[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(24): 16-17. (in Chinese)
- [10] 廖浩培, 李兆贵, 陆昆典, 黄庆岛, 谢庆丰, 黄洁. 武鸣县香瓜、毛节瓜套种木薯的生产技术规程[J]. 广东农业科学, 2011, 38(20): 32-33.
- LIAO H P, LI Z G, LU K D, HUANG Q D, XIE Q F, HUANG J. Production technical regulation of interplanting cassava with cantaloupe and hairy melon in Wuming county[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(20): 32-33. (in Chinese)
- [11] 杜进勇. 小麦间作玉米耐密的光合生理生态机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- DU J Y. Photosynthetic physiological mechanism of intercropping wheat and maize adapted to high plant density[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [12] 闫庆祥, 魏云霞, 黄洁, 李天, 徐海强. 木薯/大豆不同间作模式对木薯光合生理特性、产量的影响研究[J]. 热带农业科学, 2017, 37(12): 10-15.
- YAN Q X, WEI Y X, HUANG J, LI T, XU H Q. Effect of different intercropping patterns of cassava / soybean on photosynthesis, physiology and yield of cassava[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2017, 37(12): 10-15. (in Chinese)
- [13] 熊军, 闫海锋, 韦绍丽, 覃维治, 唐秀桦, 李韦柳, 韦民政, 郑虚. 木薯+花生间作对作物光合特性、农艺性状和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 165-168.
- XIONG J, YAN H F, WEI S L, QIN W Z, TANG X H, LI W L, WEI M Z, ZHENG X. Effects of cassava + peanut intercropping on photosynthetic characteristics, agronomic traits and yield of crops[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(6): 165-168. (in Chinese)
- [14] TILMAN D, CASSMAN K G, MATSON P A, NAYLOR R, POLASKY S. Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. Nature, 2002, 418(6898): 671-677.
- [15] 苏必孟. 木薯/花生不同间作模式竞争与互补效应的机制研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.
- SU B M. Mechanism on competition and complementation in different intercropping patterns for cassava and peanut[D]. Haikou: Hainan University, 2017. (in Chinese)
- [16] 唐秀梅, 钟瑞春, 蒋菁, 熊发前, 贺梁琼, 李忠, 韩柱强, 黄志鹏, 唐荣华. 木薯/花生间作对根际土壤微生态的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2015, 34(1): 117-124.
- TANG X M, ZHONG R C, JIANG J, XIONG F Q, HE L Q, LI Z, HAN Z Q, HUANG Z P, TANG R H. Effects of cassava/peanut intercropping on rhizosphere soil microecology[J]. Genomics and Applied Biology, 2015, 34(1): 117-124. (in Chinese)
- [17] 韩全辉. 木薯/花生不同间作模式的效应比较[D]. 海口: 海南大学, 2014.
- HAN Q H. The effects comparison of different cassava-peanut intercropping patterns[D]. Haikou: Hainan University, 2014. (in Chinese)
- [18] 崔爱花, 黄国勤. 间作对棉花产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 江西农业学报, 2021, 33(4): 22-26.
- CUI A H, HUANG G Q. Effects of intercropping on yield of cotton, microorganism quantity and enzyme activities in soil[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021, 33(4): 22-26. (in Chinese)
- [19] 陈海生, 秦昌鲜, 彭崇, 郭强, 唐利球, 陈远权, 韦持章, 覃潇敏. 甘蔗间作花生对根际土壤微生物种群及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 223-226.
- CHEN H S, QIN C X, PENG C, GUO Q, TANG L Q, CHEN Y Q, WEI C Z, QIN X M. Effects of sugarcane intercropping peanut on rhizosphere soil microbial population and enzyme activities[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(3): 223-226. (in Chinese)
- [20] 欧阳翠. 高低淀粉木薯品种块根可溶性糖含量与块根淀粉积累研究[J]. 农业科技通讯, 2018(1): 78-82.
- OUYANG C. Study on soluble sugar content and starch accumulation in root tuber of cassava varieties with high and low starch[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2018(1): 78-82. (in Chinese)
- [21] 韦婉玲, 罗兴录, 王天亮, 周信良, 吴昊. 不同木薯品种对朱砂叶螨抗性分析[J]. 南方农业学报, 2017, 48(12): 2182-2189.
- WEI W L, LUO X L, WANG T L, ZHOU X L, WU H. Resistance of different cassava varieties to *Tetranychus cinnabarinus*[J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(12): 2182-2189. (in Chinese)
- [22] 王素萍, 张贵友, 杜雷, 姜利, 黄翔, 程维舜, 罗茜, 叶莉霞, 洪娟. 不同施肥处理对甜瓜产量、品质及土壤状况的影响[J]. 长江蔬菜, 2022(6): 21-25.
- WANG S P, ZHANG G Y, DU L, JIANG L, HUANG X, CHEN W S, LUO Q, YE L X, HONG J. Effects of different fertilization treatments on yield, quality and soil condition of muskmelon[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2022(6): 21-25. (in Chinese)
- [23] 胡启国, 刘亚军, 王文静, 王祁, 王红刚, 储凤丽. 甘薯轮作与间作对根际土壤微生物群落的影响[J]. 作物杂志, 2021(5): 153-159.
- HU Q G, LIU Y J, WANG W J, WANG Q, WANG H G, CHU F L. Effects of sweet potato rotation and intercropping

- on rhizosphere soil microbial community[J]. *Crops*, 2021(5): 153-159. (in Chinese)
- [24] SRIVASTAVA S C, SINGH J S. Microbial C, N and P in dry tropical forest soils: effects of alternate land-uses and nutrient flux[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1991, 23(2): 117-124
- [25] 张伟伟. 间作对西瓜生理生化特性及根际土壤特性影响的研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2017.
ZHANG W W. Effects of intercropping on physiological and biochemical characteristics and rhizosphere soil characteristics of watermelon[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [26] 张洪勇. 辣椒/玉米间作对根际土壤微生态的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
ZAHNG H Y. Effects of pepper/maize intercropping on rhizosphere soil microecology[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [27] 殷陶刚, 窦向丽, 刘晶婧, 李玉泽. 兰州新区不同土地利用类型对土壤有机质和养分及酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(6): 32-37.
YIN T G, DOU X L, LIU J J, LI Y Z. Effects of different land use types on soil organic matter and nutrients and soil enzyme activities in Lanzhou new district[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2019(6): 32-37. (in Chinese)
- [28] 莫晶. 油茶—花生间作土壤酶活性及养分研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
MO J. Soil enzyme activity and nutrient contents in *Camellia oleifera*-*Arachis hypogaea* intercropping system[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017. (in Chinese)
- [29] 赵书军, 秦兴成, 张新然, 倡国涵, 徐祥玉, 袁家富. 不同绿肥翻压量及施肥条件下土壤酸性磷酸酶活性的变化[J]. *中国烟草科学*, 2011, 32(Suppl. 1): 99-102.
ZHAO S J, QIN X C, ZHANG X R, SI G H, XU X Y, YUAN J F. Correlation between soil acid phosphatase and soil fertility under the condition of different manuring[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2011, 32(Suppl. 1): 99-102. (in Chinese)
- [30] 储凤丽, 李淑敏, 刘亚军, 王明乾, 王文静, 胡启国, 石静, 杨爱梅. 甘薯玉米间作对土壤性质与作物产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2020, 48(9): 1445-1448, 1455.
CHU F L, LI S M, LIU Y J, WANG M Q, WANG W J, HU Q G, SHI J, YANG A M. Effects of intercropping of sweet potato and maize on soil properties and crop yield[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, 48(9): 1445-1448, 1455. (in Chinese)
- [31] 李佳懿. 外界因素对农作物品质的影响研究[J]. *农业科技与装备*, 2020(3): 77-78.
LI J Y. Study on the influence of external factors on crop quality[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2020(3): 77-78. (in Chinese)
- [32] 聂丽珍. 甘薯皮可溶性蛋白的提取及功能特性的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
NIE L Z. Studies on extraction and functional properties of sweet potato peel soluble protein[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [33] 姜凌, 张春义. 植物维生素生物强化进展[J]. *生物技术进展*, 2016, 6(6): 381-388.
JIANG L, ZAHNG C Y. Progress on vitamins fortification in plants[J]. *Current Biotechnology*, 2016, 6(6): 381-388. (in Chinese)
- [34] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(4): 403-415.
LI L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: current knowledge and perspectives[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4): 403-415. (in Chinese)