

木薯-辣椒间作模式对木薯生长、产量、品质及土壤酶活性的影响

李双江¹, 陈默¹, 谢海弘¹, 陈璐¹, 王君¹, 盛浩^{2,3*}, 宋勇^{1,2,4,5,6*}

1. 湖南农业大学园艺学院, 湖南长沙 410128; 2. 岳麓山实验室, 湖南长沙 410128; 3. 湖南农业大学资源学院, 湖南长沙 410128; 4. 湖南省马铃薯工程技术研究中心, 湖南长沙 410128; 5. 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; 6. 蔬菜生物学湖南省重点实验室, 湖南长沙 410128

摘要: 为研究木薯-辣椒间作模式下对木薯生长、光合性能、土壤酶活性、块根产量及品质的影响, 以木薯品种南植199 (甜木薯品种, 植株直立、株型紧凑、顶端一般不分枝) 和辣椒品种湘研55号 (中熟小牛角椒品种, 长势好、适应性强) 为试验材料, 设计以木薯单作 (CK) 为对照, 辣椒和木薯间作时辣椒3种不同的种植密度 (T_1 、 T_2 、 T_3 , 株距分别为0.4、0.5、0.6 m) 为处理。结果表明: 间作处理下的木薯地上部生长指标在木薯的各个生长时期均存在不同程度的抑制, 且抑制效果随密度和时间增加而加深, 故 T_3 处理的木薯地上部株高、茎粗所受抑制程度最小; 间作处理均能提高木薯苗期叶片的相对叶绿素含量, 各个间作处理能提高植株整个结薯期的净光合速率、气孔导度及块根膨大期的胞间二氧化碳浓度, 但对木薯各个生长时期的蒸腾速率并无显著性影响; 间作处理较 CK 处理均显著提高了土壤脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶等的活性, 除土壤过氧化氢酶活性在间作处理中无显著性差异外, 其余土壤酶活性均以 T_3 处理显著高于其他间作处理; 间作虽降低了地上部生物量和地下部木薯块根数量, 但能提高木薯单薯重, 间作 T_1 、 T_2 处理与 CK 产量无显著差异, 而 T_3 的亩产显著提高了13.98%; 间作能有效提高块根品质, 除可溶性糖和纤维素外, T_3 处理的多种品质含量均显著高于其他处理, 间作处理均能不同程度提高木薯块根淀粉含量, 分别提高了13.06%、8.25%、19.33%。综上所述, 木薯间作提高了木薯光合速率、土壤酶活性等从而提高木薯块根产量、品质, 增加木薯经济效益。最后以2行木薯2行辣椒的 T_3 处理 (株距0.6 m) 栽培密度最优, 为适合湖南产区的木薯辣椒间作模式。

关键词: 木薯; 间作; 光合性能; 土壤酶活性; 产量; 品质

中图分类号: S533; S641.3

文献标志码: A

Effect of Cassava-capsicum Intercropping Pattern on Growth, Yield, Quality and Soil Enzyme Activity of Cassava

LI Shuangjiang¹, CHEN Mo¹, XIE Haihong¹, CHEN Lu¹, WANG Jun¹, SHENG Hao^{2,3*}, SONG Yong^{1,2,4,5,6*}

1. College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Yuelushan Laboratory, Changsha, Hunan 410128, China; 3. College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 4. Engineering Research Center of Potato, Changsha, Hunan 410128, China; 5. Engineering Research Center for Horticultural Crop Germplasm Creation and New Variety Breeding, Ministry of Education, Changsha, Hunan 410128, China; 6. Key Laboratory for Vegetable Biology of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China

Abstract: Cassava variety Nanzhi 199 (sweet cassava variety, with erect, compact plant shape and generally unbranched at the top) and chili pepper variety Xiangyan 55 (medium maturity small cowpea variety, with good growth and strong adaptability) were used to study the effects of cassava-pepper intercropping pattern on cassava growth, photosynthetic

收稿日期 2024-03-07; 修回日期 2024-05-17

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项目 (No. CARS-11-HNSY)。

作者简介 李双江 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 木薯栽培生理。*通信作者 (Corresponding author): 盛浩 (SHENG Hao), E-mail: shenghao82@hunau.edu.cn; 宋勇 (SONG Yong), E-mail: songyong1117@163.com。

performance, soil enzyme activity, tuber yield and quality. Three different planting densities of chili peppers in chili peppers and cassava intercropping (T_1 , T_2 and T_3 , with the spacing of 0.4 m, 0.5 m and 0.6 m, respectively) were designed. The results showed that the aboveground growth indexes of cassava under intercropping treatment had different degrees of inhibition in various growth periods of cassava, and the inhibitory effect deepened with the increase of density and time, so the aboveground plant height and stem thickness of T_3 treatment were minimally inhibited; intercropping treatments were able to improve the relative chlorophyll content of cassava seedling leaves, and the intercropping treatments were able to increase the net photosynthetic rate of the whole period of potato production, stomatal conductance, and the cytosolic rate of the tuber expansion period, and intercellular carbon dioxide concentration during tuber expansion, but had no significant effect on the transpiration rate of cassava in all growth periods; intercropping treatments significantly increased the activities of soil urease, acid phosphatase, catalase and sucrase compared with CK, and the activities of the soil enzymes were significantly higher than those of other intercropping treatments by T_3 except for the activity of soil catalase which had no significant difference among the intercropping treatments; intercropping reduced the aboveground biomass and belowground biomass, and the activity of soil enzymes by T_3 ; intercropping reduced the relative chlorophyll content of cassava leaves at seedling stage. Although intercropping reduced the above-ground biomass and the number of cassava tubers in the below-ground part, it could improve the weight of cassava, and there was no significant difference between intercropping T_1 and T_2 treatments and the yield of CK, while the acreage yield of T_3 was significantly increased by 13.98%; intercropping could effectively improve the quality of tubers, and the contents of various qualities other than soluble sugar and cellulose in T_3 treatment were significantly higher than that of other treatments, among which, the intercropping treatments were able to increase the starch content of cassava tubers to different degrees, respectively, and increased the starch content of cassava tubers to different degrees. Among them, intercropping treatments were able to increase the starch content of cassava tubers to different degrees, which was increased by 13.06%, 8.25% and 19.33% respectively. In summary, cassava intercropping can improve the yield and quality of cassava tubers by increasing the photosynthetic rate and soil enzyme activity of cassava, and then increase the economic benefits of cassava. Finally, the T_3 treatment with 2 rows of cassava and 2 rows of chili peppers (plant spacing 0.6 m) had the optimal cultivation density, which was a suitable cassava-chili pepper intercropping pattern for Hunan production area.

Keywords: cassava; intercropping; photosynthetic performance; soil enzyme activity; yield; quality

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.11.012

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz), 是大戟科木薯属植物, 在全球 100 个国家和地区均有广泛种植^[1]。木薯是全球第六大粮食作物、三大薯类作物之一, 也是重要的能源作物、饲料和特色优质杂粮作物, 是世界公认的综合利用价值极高的经济作物^[2-3]。木薯作为一种重要的粮食和工业原料作物, 因其块根中富含淀粉而备受关注。其中, 块根的淀粉含量可高达 30%~38%^[4], 且价格相对低廉, 使其成为了一种极具吸引力的工业原料。在工业领域, 木薯淀粉被广泛用于生产酒精、柠檬酸、氨基酸等化工产品^[5], 同时也可用于制造胶水、造纸、纺织等行业^[6]。此外, 木薯还可作为生产生物燃料的原料^[7], 为可持续能源的发展做出贡献。

辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 是茄科辣椒属的植物, 为一年生或有限多年生草本植物。辣椒原产于拉丁美洲地区, 是最古老的农作物之一^[8], 1493 年由哥伦布带回欧洲^[9], 之后传播到世界各地。辣椒富含维生素 C, 其含量在蔬菜中最高,

辣椒具有多种营养成分, 如含有胡萝卜素、蛋白质、钙、过氧化物酶、酚类等营养成分, 具有延缓衰老、增加机体抵抗能力、抗癌等多种药理作用^[10]。同时, 辣椒还具有缓解风湿疼痛、促进消化等多种功效^[11]。随着人们对于辣椒营养价值认识的提高, 对于辣椒的需求量也越来越大, 扩大其种植面积, 寻找新的合理有效的种植模式是获得辣椒高产优质的的重要途径。

间作套种是我国传统农业的精髓所在, 是农民长期探索逐步掌握的农艺措施^[12]。EKE-OKORO 等^[13]发现, 在木薯大豆间作体系中, 多分枝木薯和中晚熟大豆品种都会对木薯株高产生抑制, 说明间作作物的共生时期和光截取能力均会对作物株高产生影响。曹曼君等^[14]对大豆玉米间作模式的研究结果表明, 盛花期间作大豆的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r) 均显著低于单作大豆, 且呈现出相同的变化趋势, 而胞间 CO_2 浓度 (C_i) 则表现出相反的变化趋势。LEGODI 等^[15]在 2019 年对木薯与豆类的间作进

行深入研究,发现间作对豆类产量的影响与其品种有关,间作降低了鹰嘴豆和花生的籽粒产量,但对豇豆产量则无影响。此外,木薯-豆类间作对产量的影响也往往和密度有关^[16]。BEDOUSSAC 等^[17]发现间作比单一作物的谷物蛋白质含量高了 1.30%,可能是由于物种的互补性,提高了非生物资源的利用率,如对土壤矿质氮和大气中 N_2 的利用等。邱江梅等^[18]发现甘蔗-花生间作模式中,间作种植对花生的过氧化氢酶的影响较大,土壤过氧化氢酶活性较花生单作提高了 55.53%,可能由于甘蔗和花生间作根系间交错叠加作用,增加了根区土壤的孔隙度,使得根系呼吸增强。

生态位分离是间作优势产生的主要生态机制,改变间作体系中株行距配置从本质上来说是改变了间作体系中作物的空间配置^[19],从而影响作物产量的形成。间作形成的作物复合群体,还可使作物增加对光能的截取与吸收^[20],减少光能的浪费。木薯的生育期较长,前期生长缓慢,种植稀疏,无法充分利用土地资源和土壤肥力,随着经济发展,生产成本的提高,木薯的高产量优势也逐步被其低经济效益所掩盖^[21],使得木薯种植面积减少^[22]。而间作可以最大程度上利用资源^[23],且木薯间作对于木薯在光合、产量、品质等方面有着非常重要的影响,合理的间作模式是提高木薯产量与品质的重要途径。但目前对木薯-辣椒间作模式下木薯生理生长变化及土壤酶活性相关研究较少。本研究以木薯单作为对照,以木薯-辣椒间作时辣椒的不同栽培密度为处理,并对单作与间作模式下木薯株高、茎粗、光合特性、产量及品质、土壤酶活性进行测定分析,探究木薯-辣椒间作模式下木薯生理生长、产量、品质及土壤酶活性的变化,为湖南产区木薯-辣椒间作栽培技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

木薯品种为南植 199 (甜木薯品种,植株直立、株型紧凑、顶端一般不分枝),由广西武鸣农技推广站提供。辣椒品种为湘研 55 号 (中熟小牛角椒品种,长势好、适应性强),由湖南湘研种业公司提供。田间试验在湖南省长沙县湘研种业试验基地进行,试验田耕种前 0~20 cm 耕层土壤理化性质为: pH 5.36,水解性氮、有效磷、速效钾含量分别为 97、20.9、109 mg/kg。全氮、全磷、

全钾、有机质含量分别为 1.24、0.51、11.9、20.6 g/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验共置 4 个处理,分别为单作木薯 (CK),木薯和辣椒间作时设置辣椒 3 种不同种植密度 (T_1 、 T_2 、 T_3 ,株距分别为 0.4、0.5、0.6 m,行距为 0.4 m)。采用 1.6 m 大垄双行种植,垄宽 1.0 m,沟宽 0.6 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 0.6 m,木薯株距均为 1.0 m。木薯与辣椒间作时辣椒在垄上种植,间作辣椒处理为每小区 2 行木薯 2 行辣椒,辣椒距离木薯行距为 0.3 m。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 $1.6\text{ m} \times 13\text{ m} = 21\text{ m}^2$ 。辣椒于 2022 年 1 月 21 日育苗,4 月 9 日移栽,5 月 28 日至 7 月 11 日分批收获,整个生长周期共 171 d。木薯于 2022 年 4 月 9 日种植,木薯与辣椒的共生生长期为 93 d。

1.2.2 指标测定 (1) 木薯生长指标的测定。每小区各选 5 株健康、无病虫害且具有小区代表性的木薯植株,对其进行株高、茎粗的测量。株高:使用卷尺测量木薯茎基部到顶端生长点的距离;茎粗:使用游标卡尺测量木薯离地 5 cm 茎基部的直径。

(2) 木薯光合指标的测定。在木薯种植 60 d 左右,每个生育时期从小区随机选取 5 株健康、无病虫害且具有小区代表性的木薯植株。使用 LI-6400XT 光合仪测定木薯同一生态位且同一朝向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)。采用手持式叶绿素测定仪测定木薯功能叶的相对叶绿素含量 (SPAD)。

(3) 土壤酶活性的测定。取土时间:于木薯收获期 (11 月 17 日) 采集土样。木薯单作取样:在选定的木薯植株中,两行木薯株距中间进行五点取样法,每个取样点在垂直方向上取 0~20 cm 土层样品。木薯-辣椒间作取样:采用五点取样法在选定的木薯-辣椒间作区域取样,每个取样点在垂直方向上取 0~20 cm 土层样品。所取土壤样品经自然风干后研磨过筛,供土壤酶活性分析测定使用。测定方法:采用靛酚蓝比色法测定土壤脲酶 (S-UE) 活性;采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶 (S-SC) 活性;采用高锰酸钾滴定法测定土壤过氧化氢酶 (S-CAT) 活性;采用磷酸苯二钠比色法测定土壤酸性磷酸酶 (S-ACP) 活性^[24]。

(4) 木薯产量、产量性状的测定。全株、单株薯重：每个处理随机选取 30 株木薯植株，使用电子秤对木薯整株的重量、木薯单株地下部薯重进行称量；单株结薯数：每个处理随机选 30 株木薯对其地下部结薯数进行记录；木薯亩产量测定：根据每小区木薯实际经济产量，按照种植密度折算每 667 m² 产量，并计算其经济效益。

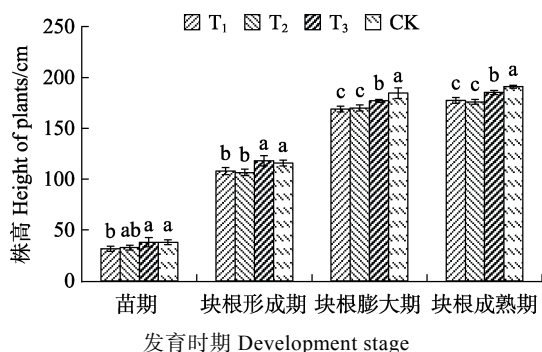
1.3 数据处理

采用 Excel 2016 软件和 Origin 8.0 软件对数据进行分析 and 制图，使用 SPSS 26 软件对数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同间作密度对木薯生长特性的影响

2.1.1 不同间作密度对木薯植株高度的影响 由图 1 可知，木薯株高的生长主要集中在苗期到块根膨大期，而在块根膨大期之后主要以根部生长为主，地上部株高长势缓慢，基本无变化。在木薯苗期，除 T₁ 处理外的间作处理与木薯单作的株高并无显著性差异。在块根形成期，T₁、T₂ 处理下的木薯株高显著低于 T₃ 与 CK 处理，且 T₃ 与 CK 处理无显著性差异。在块根膨大期和成熟期，各间作处理的木薯株高较单作均显著降低，其中，在块根成熟期木薯-辣椒间作处理分别较 CK 处理降低了 7.63%、8.40%、3.04%。



不同小写字母表示同时期的处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

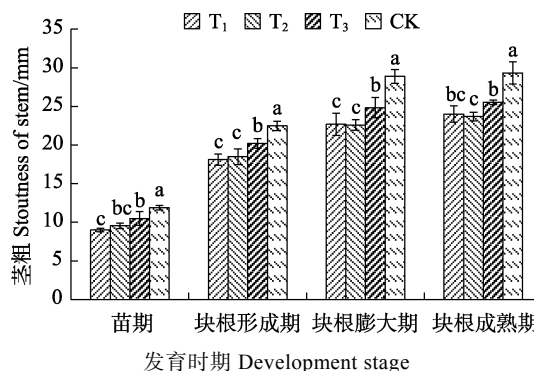
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments in the same period ($P < 0.05$).

图 1 不同间作密度下的木薯植株高度

Fig. 1 Height of cassava plants at different intercropping densities

2.1.2 不同间作密度对木薯主茎粗的影响 由图 2 可知，木薯茎粗的快速生长主要集中在木薯苗期到块根膨大期，在块根膨大期之后，木薯茎粗生长极为缓慢。在木薯的 4 个生育时期，间作处理茎粗较 CK 处理均显著降低，且 T₁、T₂ 处理均

无显著性差异，而 T₃ 处理在苗期、块根形成期、块根膨大期均显著高于其他间作处理。块根成熟期下木薯-辣椒间作处理分别较 CK 处理降低了 18.11%、19.25%、12.90%。



不同小写字母表示同时期的处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments in the same period ($P < 0.05$).

图 2 不同间作密度下的木薯主茎粗度

Fig. 2 Main stem thickness of cassava under different intercropping densities

2.2 不同间作密度对木薯叶片光合特性的影响

2.2.1 不同间作密度对木薯叶片叶绿素相对含量 (SPAD) 的影响 由图 3A 可知，木薯各个时期叶片的相对叶绿素含量整体变化不大，在木薯苗期，间作处理均显著高于 CK，分别提高了 14.65%、14.80%、13.59%；在块根形成期，各处理并无显著性差异。在块根膨大期，T₃ 处理的相对叶绿素含量显著高于 CK，但 T₁、T₂ 与 CK 处理之间同样无显著性差异；在块根成熟期，T₃ 与 CK 处理间无显著性差异且均显著高于 T₂。

2.2.2 不同间作密度对木薯叶片净光合速率 (P_n) 的影响 由图 3B 可知，各处理木薯的叶片净光合速率随着生育期推进呈现先增加后降低的趋势。在木薯苗期，各间作处理净光合速率较 CK 处理均在显著降低；在块根形成期和块根膨大期，间作处理净光合速率较 CK 处理均显著提高，其中块根形成期木薯间作较 CK 的净光合速率分别提高了 22.54%、18.42%、19.32%；在块根成熟期，T₂、T₃ 处理的净光合速率显著高于 CK 处理，而 T₁ 与 CK 处理的净光合速率差异不显著。综合来看，合理的间作模式能够促进整个结薯期的净光合速率。

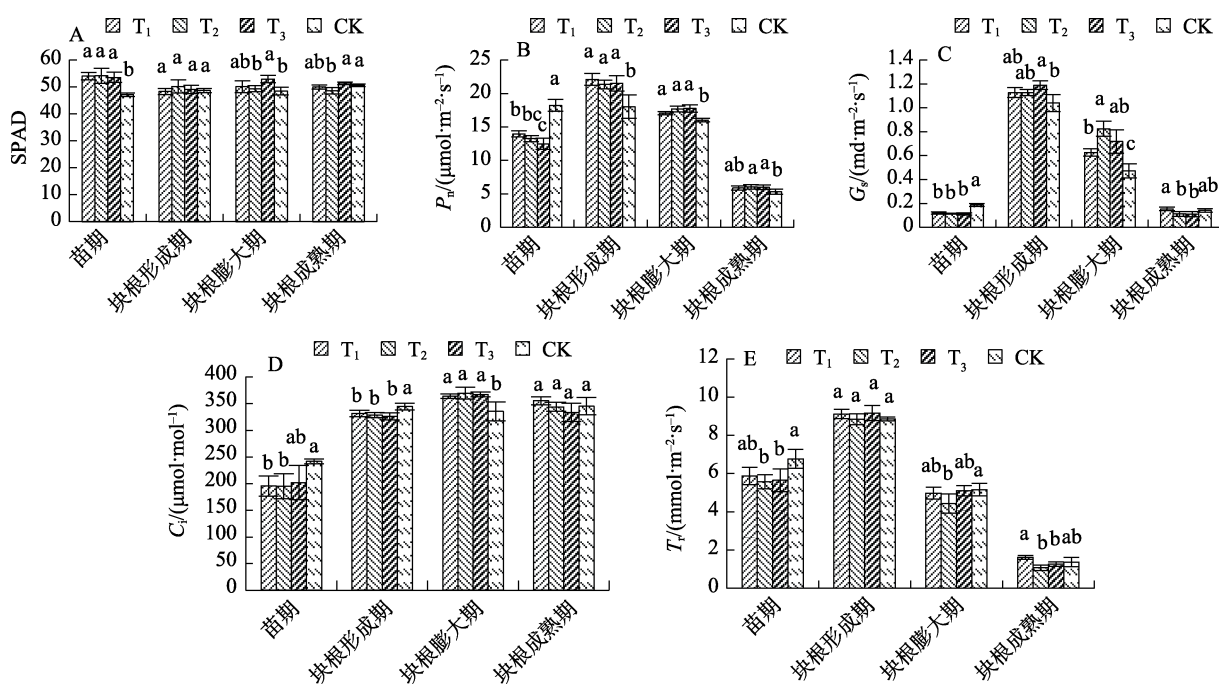
2.2.3 不同间作密度对木薯叶片气孔导度 (G_s) 的影响 由图 3C 可知，木薯叶片气孔导度随其生育期推进整体呈现先升高后降低的趋势。在木薯苗期，各间作处理均显著低于 CK；在块根形成期，T₃ 处理较 CK 处理的气孔导度显著增加了

14.29%，其余间作处理与 CK 之间并无显著性差异；在块根膨大期，各间作处理气孔导度均显著高于 CK，分别增加了 32.65%、74.86%、52.01%；在块根成熟期， T_1 处理与 CK 处理的气孔导度并无显著性差异， T_2 、 T_3 处理均显著低于 T_1 处理。

2.2.4 不同间作密度对木薯叶片胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的影响 由图 3D 可知，木薯叶片的胞间二氧化碳浓度在块根形成期前提高较多，而进入块根形成期后，胞间二氧化碳浓度变化较小。在木薯苗期和块根形成期，间作各处理的叶片胞间二氧化碳浓度较 CK 处理均出现不同程度降低；在块根膨大期，各间作处理的叶片胞间二氧化碳浓

度较 CK 处理均显著提高，分别增加了 8.47%、10.22%、9.48%。在块根成熟期，各处理的叶片胞间二氧化碳浓度并无显著性差异。

2.2.5 不同间作密度对木薯叶片蒸腾速率 (T_r) 的影响 由图 3E 可知，随着木薯生长时期的推进，叶片蒸腾速率呈现先升高后降低的趋势。在木薯苗期，各间作处理的蒸腾速率均出现不同程度降低，其中 T_2 、 T_3 处理显著低于 CK 处理；在块根形成期，各间作处理的蒸腾速率较 CK 处理并无显著性差异；在块根膨大期， T_2 处理显著低于 CK 处理；在块根成熟期， T_1 处理显著高于其他间作处理。



不同小写字母表示同时期的处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments in the same period ($P < 0.05$).

图 3 不同间作密度下的木薯叶片光合特性

Fig. 3 Photosynthetic properties of cassava leaves under different intercropping densities

2.3 不同间作密度对土壤酶活性的影响

由表 1 可知，各间作处理土壤酶活性较 CK 处理均出现不同程度的提高。 T_3 处理土壤脲酶、酸性磷酸酶活性显著高于其余处理，较 CK 处理提高最多，分别提高了 94.09%、15.61%。 T_2 、 T_3 处理的土壤蔗糖酶活性并无显著性差异但均显著高于 CK 处理。各间作处理土壤过氧化氢酶活性均显著高于 CK，但各间作处理之间并无显著性差异。

2.4 不同间作密度对木薯块根产量与品质的影响

2.4.1 不同间作密度对木薯块根产量的影响

2 可知，间作处理均显著降低了木薯全株重和单株结薯数， T_3 处理的单株薯重、小区产量、亩产量和经济效益均显著高于 CK 处理，其中， T_3 处理鲜薯产量提高了 13.96%。而 T_1 、 T_2 与 CK 处理间并无显著性差异。说明 T_3 处理主要通过增加了薯重影响产量性状进而增加产量和经济效益。

2.4.2 不同间作密度对木薯块根品质的影响 由表 3 可知， T_2 、 T_3 处理显著提高了木薯块根中维生素 C 含量。各间作处理均较 CK 处理显著提高了还原糖含量。 T_1 、 T_3 处理的可溶性糖含量较 CK 处理显著降低。 T_2 较 CK 处理显著提高了木薯可

溶性蛋白含量。各间作处理均从不同程度上提高了木薯淀粉含量，分别提高了 13.06%、8.25%、19.33%。间作处理能够显著降低木薯纤维素含量，其中以 T₃ 处理纤维素含量降低幅度最大，为 39.14%。木薯 T₁、T₃ 处理的干物率较 CK 显著增加，分别提高了 7.54%、5.86%。

表 1 不同间作密度下的土壤酶活性
Tab. 1 Soil enzyme activities at different intercropping densities

处理 Treatment	土壤脲酶活性 Activity of soil urease ($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	土壤蔗糖酶活性 Activity of soil sucrose ($\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	土壤过氧化氢酶活性 Activity of soil catalase ($\mu\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	土壤酸性磷酸酶活性 Activity of soil phosphatase ($\text{nmol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)
T ₁	136.35±11.11 ^b	9.43±0.70 ^{bc}	307.23±34.97 ^a	1918.10±26.70 ^c
T ₂	132.04±3.12 ^b	10.48±0.42 ^{ab}	332.4±42.87 ^a	2089.52±140.48 ^b
T ₃	179.99±10.03 ^a	11.11±0.93 ^a	293.94±15.28 ^a	1922.97±80.48 ^a
CK	92.74±1.98 ^c	8.29±0.48 ^c	208.38±17.93 ^b	1663.34±82.05 ^d

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 data in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

表 2 不同间作密度下的木薯产量及产量性状
Tab. 2 Cassava yield and yield traits at different intercropping densities

处理 Treatment	全株重 Whole-plant weight/kg	薯重 Storage root weight/kg	薯数 Number of storage roots	小区产量 Plot yield/kg	鲜薯产量 Fresh storage root yield/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	经济效益 Economic bene- fit/(元· hm^{-2})
T ₁	4.19±0.07 ^c	2.14±0.06 ^b	7.93±0.76 ^c	68.15±1.38 ^b	32.78±0.66 ^b	24585.13±496.58 ^b
T ₂	4.41±0.03 ^{bc}	2.19±0.11 ^b	8.17±0.32 ^{bc}	69.76±4.18 ^b	33.55±2.01 ^b	25166.18±1509.63 ^b
T ₃	4.63±0.21 ^b	2.52±0.06 ^a	9.27±0.12 ^b	80.78±1.94 ^a	38.85±0.93 ^a	29141.21±700.33 ^a
CK	5.40±0.26 ^a	2.21±0.08 ^b	11.57±1.07 ^a	70.87±2.83 ^b	34.09±1.36 ^b	25566.38±1019.64 ^b

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 data in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

表 3 不同间作密度下的木薯品质
Tab. 3 Cassava quality at different intercropping densities

处理 Treatment	维生素 C Vitamin C/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	还原糖 Reducing sugar/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	可溶性糖 Soluble sugar/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	可溶性蛋白 Soluble protein/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	淀粉 Starch/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	纤维素 Cellulose/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	干物率 Dry matter rate/%
T ₁	0.266±0.010 ^c	2.410±0.088 ^a	16.877±1.443 ^b	1.347±0.158 ^{ab}	286.358±7.295 ^{ab}	0.978±0.015 ^b	43.26±0.01 ^a
T ₂	0.318±0.006 ^b	2.311±0.117 ^a	29.594±4.005 ^a	1.505±0.083 ^a	274.183±6.636 ^b	0.998±0.018 ^b	41.66±0.01 ^{ab}
T ₃	0.485±0.034 ^a	1.635±0.058 ^b	20.365±0.750 ^b	1.329±0.055 ^{ab}	302.248±6.767 ^a	0.742±0.017 ^c	42.59±0.01 ^a
CK	0.259±0.011 ^c	1.364±0.170 ^c	33.414±0.504 ^a	1.108±0.132 ^b	253.281±14.494 ^c	1.219±0.119 ^a	40.22±0.01 ^b

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 data in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

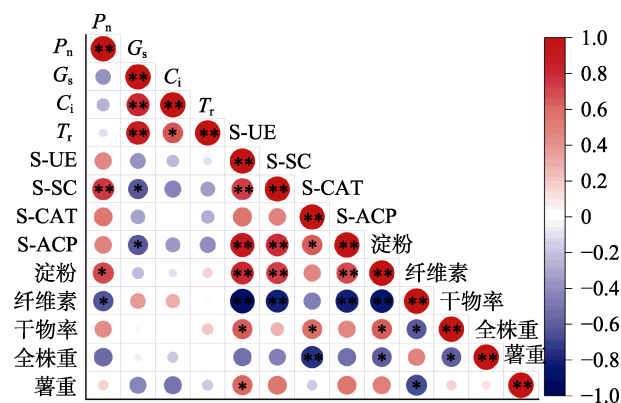
2.5 间作模式下部分木薯光合特性、土壤酶活性、产量及品质指标的相关性分析

木薯-辣椒间作模式下木薯的部分指标相关性分析结果如图 4 所示，其中 14 个指标呈极显著相关（ $P<0.01$ ），14 个指标呈显著相关（ $P<0.05$ ）。净光合速率（ P_n ）与块根淀粉含量呈显著正相关，与纤维素含量呈显著负相关。土壤脲酶（S-UE）、蔗糖酶（S-SC）、酸性磷酸酶（S-ACP）活性均与块根淀粉含量呈极显著正相关，与纤维素含量呈极显著负相关。淀粉含量与干物率呈显著正相

关，土壤过氧化氢酶（S-CAT）活性与全株重呈极显著负相关，土壤脲酶活性与薯重呈显著正相关。

3 讨论

植株高度、主茎粗度等指标是衡量植物生长状态的重要农艺性状，不同的间作模式下，由于植株的化感作用和接受调节机制的不同，以及间作存在一定的种间竞争，使得间作模式对不同作物的影响不同^[25]。本研究结果表明，木薯-辣椒间作模式中，T₁ 处理对苗期的株高产生显著抑制，



*表示显著相关 ($P < 0.05$), **表示极显著相关 ($P < 0.01$)。
* indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant correlation.

图 4 木薯辣椒间作模式部分光合特性、土壤酶活性、产量及品质的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of some photosynthetic characteristics, soil enzyme activities, yield and quality of cassava-pepper intercropping patterns

T_2 、 T_3 处理对块根形成期的株高产生显著抑制, T_1 、 T_2 、 T_3 处理对块根膨大期的株高产生显著抑制。由此可见, 木薯-辣椒间作模式对木薯株高的抑制作用随生育期的推进愈发明显, 其中, T_3 处理受抑制时间显著较短, 同时各间作处理的主茎粗度也受到抑制, 其中 T_3 处理的主茎粗度受抑制程度最小。地上部生长指标并未出现明显的“竞争-恢复”的现象^[26], 可能与辣椒的多次采收消耗土壤养分及该间作模式下复杂的化感作用有关。由此可见, 木薯-辣椒间作模式中存在种间竞争, 且对地上部生物量的竞争效果随时间和种植密度增加而增加。

光合作用是植物最基本的生命活动, 是植物合成有机物质和获取能量的根本来源^[27]。本研究结果表明, 在木薯苗期, 间作处理均不同程度提高了叶片相对叶绿素含量, 此时互作效益使微环境得到改善, 促进了叶绿素的合成及其稳定性, 这与崔文芳等^[28]的研究结果一致。在木薯苗期, 由于此时间作辣椒植株高度较高, 具有较高的光能截取率, 给木薯苗遮阴, 降低了其叶片光合同化效率; 或因木薯在苗期阶段对营养竞争能力较弱, 使得植株叶片整体生理性能下降。在块根形成期和块根膨大期, 木薯净光合速率和气孔导度均有显著性提高, 这主要源于木薯间作模式微环境湿度适宜, 使得气孔导度提高, 进而提高了净光合速率。而块根形成期的胞间二氧化碳浓度降低主要与该时期净光合速率提高有关, 说明该时期净光合速率一定程度上受到气孔因素限制^[29]; 块根膨

大期的胞间二氧化碳浓度提高, 说明此时净光合速率受到叶片光合同化能力的因素限制, 且蒸腾速率降低可能与在块根膨大期阶段呼吸根转为贮藏根使得根系活力减弱有关。因此, 间作模式能在整个结薯阶段一定程度上提高叶片光合能力, 其中 T_2 、 T_3 处理为优。

土壤酶活性在作物根系生境中影响土壤有效成分含量、土壤呼吸强度等, 进而提高作物产量。本研究结果表明, 各间作处理均从一定程度上提高了土壤酶活性, 其中以 T_3 处理效果最优, 这可能因为间作模式中 2 种作物互作, 使得土壤中根系分泌物更丰富, 土壤微生物更活跃, 改善土壤环境, 从而提高了土壤酶活性^[30]。而栽植过密的间作处理, 植株密度较大, 使得土壤养分下降, 进而影响土壤酶活性。其中土壤过氧化氢酶活性能够反映土壤呼吸的强弱, 说明间作处理能够显著改善土壤孔隙度, 利于植株吸收养分。土壤过氧化氢酶活性与土壤有机质含量有关, 本研究各间作处理的土壤过氧化氢酶活性为 $T_3 > T_2 > T_1$, 说明密度大的间作处理对有机质消耗较大。

作物产量决定着作物经济效益, 其受外部环境、栽培技术等多种因素影响, 合理密植、充分利用环境资源是增产增效的关键所在。因此, 间作是能够在不降低主要作物产量的前提下, 最大限度提高土地利用效率和盈利能力的种植模式^[31]。本研究结果表明, 间作处理均降低了木薯的全株重, 但 T_3 处理显著提高了地下部薯重, 这可能与间作通过限制地上部生物量和改善作物土壤生境有关。随着种植密度的增加, 木薯结薯数随之降低, 而 T_1 、 T_2 处理又与单作单株薯重无显著性差异, 说明间作主要通过增加单薯重来改变产量性状, 因此, T_3 间作处理得到了增产。说明木薯-辣椒间作模式通过合理密植能够增加木薯产量并额外收获辣椒农产品进而增加地块经济效益。

作物品质对其经济价值和使用途径等方面有着直接影响, 而栽培手段和环境因素是改变品质的重要因素。本研究结果表明, 木薯-辣椒间作模式能够提高木薯块茎中除可溶性糖以外的多种营养成分, 并降低块茎纤维素含量。块根中多种成分的提高, 可能与块根形成期与膨大期的光合指标增强有关。而纤维素作为一种不可溶性膳食纤维, 虽对人体有益, 但过高的纤维素会影响木薯块根口感, 这可能与间作处理提供了较好的土壤环境如增强土壤呼吸、提高保水性等有关。同时,

淀粉与纤维素呈负相关的结果与 SUN 等^[32]的研究一致。

综上所述,与木薯单作相比,辣椒-木薯间作模式虽然降低了木薯的地上部株高和茎粗,但能提高木薯叶片的光合特性及增强土壤酶活性,进而提高作物产量和品质,提高经济效益。最后以 2 行木薯间作 2 行辣椒、辣椒株距为 0.6 m 的栽培模式 (T_3) 为最优,为适合湖南产区的木薯-辣椒间作模式。

参考文献

- [1] 张建禹, 王晓彤, 耿沙, 毋志浩, 任思杨, 李瑞梅, 姚远, 郭建春, 刘姣, 胡新文. 木薯 MeAHL19 的互作蛋白筛选及鉴定[J]. 农业生物技术学报, 2022, 30(8): 1454-1467.
ZHANG J Y, WANG X T, GENG S, WU Z H, REN S Y, LI R M, YAO Y, GUO J C, LIU J, HU X W. Screening and characterization of intercalating proteins of cassava MeAHL19[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2022, 30(8): 1454-1467. (in Chinese)
- [2] 颜欢, 武少民, 尚凯元. 见证中国发展促进友好交往[N]. 人民日报, 2023-09-03.
YAN H, WU S M, SHANG K Y. Witnessing China's development and promoting friendly exchanges[N]. People's Daily, 2023-09-03. (in Chinese)
- [3] 欧文军, 韦卓文, 梁海波, 夏秀云, 李开绵. 推动中非木薯科技合作服务国家“一带一路”战略[J]. 中国热带农业, 2016(4): 9-12.
OU W J, WEI Z W, LIANG H B, XIA X Y, LI K M. Promoting scientific and technological cooperation of cassava in China and Africa to serve the national “Belt and Road” strategy[J]. China Tropical Agriculture, 2016(4): 9-12. (in Chinese)
- [4] 张婷, 陈小伟, 赵优萍, 范昊安, 姚刚, 蔡海莺, 毛建卫. 木薯副产物的综合利用现状及发展趋势[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 343-349.
ZHANG T, CHEN X W, ZHAO Y P, FAN H A, YAO G, CAI H Y, MAO J W. Current status and development trend of comprehensive utilization of cassava by-products[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(8): 343-349. (in Chinese)
- [5] 黄洁, 李开绵, 叶剑秋, 程序. 中国木薯产业化发展研究与对策[J]. 中国农学通报, 2006(5): 421-426.
HUANG J, LI K M, YE J Q, CHENG X. Development research and countermeasures of cassava industrialization in China[J]. China Agronomy Bulletin, 2006(5): 421-426. (in Chinese)
- [6] 古碧, 李开绵, 张振文, 谢彩峰, 李凯. 我国木薯加工产业现状与发展趋势[J]. 农业工程技术(农产品加工业), 2013(11): 25-31.
GU B, LI K M, ZHANG Z W, XIE C F, LI K. Development status and development trend of cassava processing industry in China[J]. Agricultural Engineering Technology (Agricultural Product Processing Industry), 2013(11): 25-31. (in Chinese)
- [7] MALIK A I, KONGSIL P, NGUYN V A, OU W, ISHITANI M. Cassava breeding and agronomy in Asia: 50 years of history and future directions[J]. Breeding Science, 2020, 70(2): 145-166.
- [8] 邹学校, 胡博文, 熊程, 戴雄泽, 刘峰, 欧立军, 杨博智, 刘周斌, 索欢, 徐昊, 朱凡, 远方. 中国辣椒育种 60 年回顾与展望[J]. 园艺学报, 2022, 49(10): 2099-2118.
ZOU X X, HU B W, XIONG C, DAI X Z, LIU F, OU L J, YANG B Z, LIU Z B, SUO H, XU H, ZHU F, YUAN F. Review and prospect of 60 years of *Capsicum* breeding in China[J]. Journal of Horticulture, 2022, 49(10): 2099-2118. (in Chinese)
- [9] 邹学校, 马艳青, 戴雄泽, 李雪峰, 杨莎. 辣椒在中国的传播与产业发展[J]. 园艺学报, 2020, 47(9): 1715-1726.
ZOU X X, MA Y Q, DAI X Z, LI X F, YANG S. Propagation and industrial development of chili peppers in China[J]. Journal of Horticulture, 2020, 47(9): 1715-1726. (in Chinese)
- [10] 周欣悦, 刘夏阳, 李壮, 郭晓红. 辣椒素的抗肿瘤作用及分子机制研究进展[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(16): 4277-4283.
ZHOU X Y, LIU X Y, LI Z, GUO X H. Progress of anti-tumor effect and molecular mechanism of capsaicin[J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2022, 47(16): 4277-4283. (in Chinese)
- [11] 程震勇, 周海涛. “神农草”本草膏药、双氯芬酸二乙胺凝胶中西药结合“二联疗法”治疗颈肩腰腿痛临床研究[J]. 时珍国医国药, 2021, 32(11): 2691-2692.
CHENG Z Y, ZHOU H T. Clinical study on the treatment of neck, shoulder, lumbar and leg pain with the “two-combination therapy” combining Chinese and western medicines of “Shennongcao” herbal ointment and diclofenac diethylamide gel[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2021, 32(11): 2691-2692. (in Chinese)
- [12] 李建. 中国古代耕作制度演变[N]. 中国社会科学报, 2023-08-18.
LI J. Evolution of farming system in ancient China[N]. China Social Science News, 2023-08-18. (in Chinese)
- [13] EKE-OKORO O N, NJOKU D N, IKEORGU J G. Evaluation of the productivity of low cyanide cassava varieties in cassava/soybean intercrop[J]. Entific Research and Essays, 2008, 3(10): 495-499.
- [14] 曹曼君, 王婧瑜, 崔悦, BLESSING D J, 李双, 陈喜凤,

- 谷岩. 不同玉米大豆间作行比大豆光合特性及产量的影响[J]. 大豆科学, 2023, 42(1): 48-54.
- CAO M J, WANG J Y, CUI Y, BLESSING D J, LI S, CHEN X F, GU Y. Effects of different corn-soybean intercropping row ratios on photosynthetic characteristics and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2023, 42(1): 48-54. (in Chinese)
- [15] LEGODI K D, OGOLA J B O. Cassava-legume intercrop: II. effects of relative planting dates of legumes on the productivity of legumes[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2020, 70(2): 158-164.
- [16] 宁德娇, 郭小红, 汤复跃, 陈文杰, 梁江, 谢丽萍, 陈渊, 韦清源. 不同宽窄行木薯 || 大豆对间作体系产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2023, 42(4): 424-431.
- NING D J, GUO X H, TANG F Y, CHEN W J, LIANG J, XIE L P, CHEN Y, WEI Q Y. Effects of different narrow and wide rows of cassava || soybean on yield and quality in intercropping systems[J]. Soybean Science, 2023, 42(4): 424-431. (in Chinese)
- [17] BEDOUSSAC L, JOURNET E P, HAUGGAARD-NIELSEN H, NAUDIN C, CORRE-HELLOU G, JENSEN E S, PRIEUR L, JUSTES E. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(3): 911-935.
- [18] 邱江梅, 吴海宁, 黄志鹏, 贺梁琼, 李忠, 钟瑞春, 韩柱强, 蒋菁, 黎冰, 唐秀梅, 唐荣华. 甘蔗/花生间作对根系生理及根际土壤养分的影响[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(4): 889-896.
- QIU J M, WU H N, HUANG Z P, HE L Q, LI Z, ZHONG R C, HAN Z Q, JIANG J, LI B, TANG X M, TANG R H. Effects of sugarcane/peanut intercropping on root physiology and inter-root soil nutrients[J]. Chinese Journal of Oil Crop, 2024, 46(4): 889-896. (in Chinese)
- [19] 任媛媛, 张莉, 郁耀闯, 张彦军, 张岁岐. 大豆种植密度对玉米/大豆间作系统产量形成的竞争效应分析[J]. 作物学报, 2021, 47(10): 1978-1987.
- REN Y Y, ZHANG L, YU Y C, ZHANG Y J, ZHANG S Q. Analysis of competitive effects of soybean planting density on yield formation in corn / soybean intercropping systems[J]. Journal of Crops, 2021, 47(10): 1978-1987. (in Chinese)
- [20] BAI W L, ZHANG M Y, REN J B, TANG L, ZHENG Y, XIAO J X. Simulation of crop growth curve and analysis of interspecific interaction in wheat and faba bean intercropping system.[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 4037-4046.
- [21] 何春燕. 生态足迹视角下广西耕地可持续利用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
- HE C Y. Research on sustainable utilization of cultivated land in Guangxi under the perspective of ecological footprint [D]. Nanning: Guangxi University, 2023. (in Chinese)
- [22] 滕继宏. 内生固氮菌 A02(*Curtobacterium* sp.) 和 A08(*Microbacterium* sp.)对木薯生长的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- TENG J H. Effects of endophytic nitrogen-fixing bacteria A02 (*Curtobacterium* sp.) and A08 (*Microbacterium* sp.) on the growth of cassava[D]. Nanning: Guangxi University, 2022. (in Chinese)
- [23] 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. Research progress and application prospect of intercropping to strengthen farmland ecosystem service function[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2016, 24(4): 403-415. (in Chinese)
- [24] 孙彬杰, 姜舒雅, 李双江, 陈文杰, 邹天浩, 宋勇. 甜瓜和木薯间作模式对甜瓜生长及土壤酶活性的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(6): 43-49.
- SUN B J, JIANG S Y, LI S J, CHEN W J, ZOU T H, SONG Y. Effects of melon and cassava intercropping on melon growth and soil enzyme activity[J]. Chinese Melon and Vegetable, 2023, 36(6): 43-49. (in Chinese)
- [25] 董淑琦, 翟旭涛, 胡春艳, 郭振宇, 杨雪芳, 宋喜娥, 郭平毅, 原向阳. 小麦秸秆及浸提液对 4 种谷田杂草的化感防除作用[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(6): 113-123.
- DONG S Q, ZHAI X T, HU C Y, GUO Z Y, YANG X F, SONG X E, GUO P Y, YUAN X Y. Effects of wheat straw and extract on the control of four cereal weeds[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(6): 113-123. (in Chinese)
- [26] 刘丽娟, 黄洁, 魏云霞, 王娟. 木薯 || 玉米间作模式对木薯产量、薯构型及土壤性质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(11): 22-35.
- LIU L J, HUANG J, WEI Y X, WANG J. Effects of cassava-maize intercropping on cassava yield, potato configuration and soil properties[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(11): 22-35. (in Chinese)
- [27] 陈子川, 潘国营, 陈灿, 徐云鹏, 林晗, 陈煜, 谢安强, 范海兰. 光强对木麻黄幼苗根系形态、解剖结构及其碳氮含量影响研究[J]. 生态学报, 2024, 44(10): 4377-4387.
- CHEN Z C, PAN G Y, CHEN C, XU Y P, LIN H, CHEN Y, XIE A Q, FAN H L. Effects of light intensity on root morphology, anatomical structure and carbon and nitrogen contents of *Pinellia ternata* seedlings[J]. Journal of Ecology, 2024, 44(10): 4377-4387. (in Chinese)
- [28] 崔文芳, 秦德志, 陈静, 刘剑, 严海鸥, 秦丽. 玉米大豆不

- 间作系统光合特性与产量边际效应[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 309-319.
- CUI W F, QIN D Z, CHEN J, LIU J, YAN H O, QIN L. Photosynthetic characteristics and yield marginal effects of different intercropping systems of corn and soybean[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 309-319. (in Chinese)
- [29] 王林, 王雪琳, 徐文硕, 黎心怡, 裴鑫, 李夏菁, 贾小云, 贺立恒. 基施硫肥与遮荫对甘薯生长及同化产物积累的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(3): 574-583.
- WANG L, WANG X L, XU W S, LI X Y, PEI X, LI X J, JIA X Y, HE L H. Effects of basal application of sulfur fertilizer and shade on growth and accumulation of assimilation products of sweetpotato[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2024, 38(3): 574-583. (in Chinese)
- [30] 吕晴晴, 何宁, 张永江, 迟宝杰, 张艳军, 张冬梅, 董合忠. 间作和轮作通过根冠互作调控作物产量形成的生理生态机制[J]. 植物生理学报, 2023, 59(7): 1277-1290.
- LYU Q Q, HE N, ZHANG Y J, CHI B J, ZHANG Y J, ZHANG D M, DONG H Z. Physiological and ecological mechanisms of intercropping and crop rotation in regulating crop yield formation through root-crown interactions[J]. Journal of Plant Physiology, 2023, 59(7): 1277-1290. (in Chinese)
- [31] LI L, HE Q L, LI C M, YANG J, LI C Y. The dynamics of soil microbe metabolic function diversity in the root-zone of maize-soybean intercropping[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2019, 21(3): 639-647.
- [32] SUN J, HUI K, GUO Z, LI Y, FAN X. Cellulose and lignin contents are negatively correlated with starch accumulation, and their correlation characteristics vary across cassava varieties[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2023, 42(2): 658-669.