

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.05.010

间作模式对桑园土壤养分及产量效益的影响

周丽, 贺兵, 李冬兵, 刘学锋,
曹文, 余世权, 刘筱雪, 王一

宜宾市农业科学院, 四川 宜宾 644000

摘要: 为探究不同桑园间作模式下各间作体系产量和经济效益的差异, 并优化桑园间作, 以桑树净作(CK)为对照, 另设桑树间作大豆(MS)、桑树间作花生(MP)、桑树间作甘薯(MSt)、桑树间作马铃薯(MPt)4 种间作模式, 分析了 5 种模式对桑园土壤肥力、桑叶及间作物产量、种间竞争力指数和系统综合经济效益的影响。结果表明: 种植模式显著影响了桑园土壤养分含量、系统产量和综合经济效益。土壤养分随生育时期而变化, 至共生结束, MS, MP 两种养地间作模式土壤 pH 值分别降低了 2.37%, 0.39%, 全氮和全钾含量比共生前分别增加了 0.76%, 11.49% 和 2.03%, 0.26%; MSt, MPt 两种耗地作物土壤 pH 值升高了 5.71%, 4.34%, 土壤全磷含量降低了 5.56%, 2.04%, 两者在土壤全氮和全钾含量的变化规律相反: MSt 减少 11.41%、MPt 增加 8.03%, MSt 增加 0.83%、MPt 减少 8.50%。与净作相比, MS, MSt, MPt 模式下桑叶产量分别提高 32.90%, 35.50%, 13.05%, MP 降低 10.55%, 间作物产量较净作减少, 但系统产量总体增加。除花生外, 间作下大豆、甘薯、马铃薯的种间竞争能力均弱于桑树; 各模式产投比从大到小依次为: MS, MP, MSt, MPt; 间作提高了土地利用效率; MSt, MS, MPt 和 MP 模式分别增加了间作物纯收入。综合考虑土壤养分含量、产投比、LER 值和桑园综合经济效益等因素, 在桑园中间作大豆具有更高的土壤可持续性和经济推广价值。

关键词: 桑园间作; 土壤养分; 土地当量比; 产量;
综合经济效益

中图分类号: S314.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)05-0100-08

Effects of Different Intercropping Patterns on Soil Fertility, Yield and Economic Benefit of Mulberry Field

ZHOU Li, HE Bing, LI Dongbing, LIU Xuefeng,
CAO Wen, YU Shiquan, LIU Xiaoxue, WANG Yi

Yibin Academy of Agricultural Sciences, Yibin Sichuan 644000, China

Abstract: In order to explore the difference in yield, economic benefit of different intercropping systems

收稿日期: 2022-05-26

基金项目: 财政部、农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-18-SYZ19); 宜宾市科技计划项目(2022NY008)。

作者简介: 周丽, 硕士, 助理研究员, 主要从事作物高产优质高效栽培理论与土壤质量研究。

通信作者: 王一, 高级农艺师。

and optimize the intercropping for mulberry production, an experiment was performed with five planting patterns: mulberry monoculture (CK), mulberry-soybean intercropping (MS), mulberry-peanut intercropping (MP), mulberry-sweet potato intercropping (MSt), mulberry-potato intercropping (MPt). The soil nutrient content, yield of mulberry leaf and intercropped crops, interspecific competitiveness index and comprehensive economic benefit of five planting patterns were analyzed in this paper. The results showed that planting patterns significantly affected the soil nutrient content, systematic yield and comprehensive economic benefit of mulberry field. Soil nutrients varied with the growth stage, at the end of symbiosis, soil pH value of MS and MP decreased by 2.37% and 0.39%, respectively, while total nitrogen and total potassium contents increased by 0.76%, 11.49% and 2.03%, 0.26%, respectively, compared with that before the symbiosis. MSt and MPt resulted the increase of soil pH value by 5.71% and 4.34%, and decrease of total phosphorus content by 5.56% and 2.04%, respectively. The trends of the change on soil total nitrogen and total potassium content were opposite with the total nitrogen decreased by 11.41% in MSt and increased by 8.03% in MPt, and total potassium increased by 0.84% in MSt and decreased by 8.50% in MPt. Compared with CK, the mulberry leaf yield of MS, MSt and MPt increased by 32.90%, 35.50% and 13.05%, respectively. However, it decreased by 10.55% in MP. Interspecific competition ability of soybean, sweet potato and potato was weaker than that of mulberry. The output/input ratio of each intercropping pattern reducing as MS, MP, MSt, MPt. Compared with CK, the land utilization rate was much higher in mulberry intercropping system. Taking into account the factors such as soil nutrient content, output/input ratio, LER and comprehensive economic benefit of plant patterns of mulberry field, the mulberry-soybean intercropping system has a better improvement effect. It could be better for soil sustainability with good promotion value.

Key words: intercropped mulberry field; soil fertility; LER; yield; comprehensive economic benefit

桑树(*Morus alba* L.)为桑科桑属,多年生木本植物,是蚕桑生产中的重要经济作物.我国栽桑养蚕历史悠久^[1],蚕桑规模居世界首位.20世纪80年代,养蚕成为农民的家庭副业之一;20世纪90年代以“人均一亩桑,户养一张蚕”逐步扩大家庭蚕桑生产规模;21世纪初开始养蚕规模化、集约化、标准化探索.2021年,我国桑园面积达到79.67万hm²,但以家庭为主的传统养蚕模式仍占据主要地位,这种模式应对自然、市场等风险能力较弱,在很大程度上影响家庭年收入.如何提高蚕桑产业附加值、增加蚕农收入是桑园综合利用研究的重要内容.

间套作是一种具有显著优势的种植模式^[2-5],是解决粮地矛盾、提高农民收入的有效途径之一.研究表明,合理的间套作是利用不同作物在生物特性、形态结构方面对光、肥、水等资源利用效率的差异性^[6],提高土地利用效率^[7],充分利用光、温、水等资源,有效减少虫害、草害^[8]、病害发生^[9],改善土壤理化性状,促进作物养分吸收和增产^[10-14].随着桑园建设规模化、标准化程度提高,桑园间套作等桑园综合利用生产方式不断推广,亩桑生产效益得到进一步提高,但《齐民要术》记载:“其(桑)下常斫掘,种菘豆(即绿豆)、小豆,二豆良美润泽益桑”.因此,在桑园中发展合理的间套作,才有可能提高桑园的土地利用率,充分利用桑园自然资源,实现桑园增产、蚕农增收.同时,间套作通过翻土等耕作措施,能够改善土壤结构^[15],促进桑树生长^[16],增加蚕农的直接经济收入.研究表明,桑树与大豆间作后,桑树的株高、叶绿素含量、根干质量、地上生物产量等指标均高于单作^[16].目前,在桑园中进行间套作的行为较为普遍,但缺乏筛选,对于桑树与不同作物间套作后桑园土壤肥力情况和不同桑园间作模式经济效益的研究和报道不足.本研究设置桑树净作处理作为对照,另设2个耗地间作模式(MS,MP)和2个养地间作模式(MSt,MPt),分析了5种桑园种植模式下土壤理化性质、作物产量和综合经济效益差异情况,揭示了不同间作模式下作物差异对桑园土壤、综合经济效益的影响,为优化桑园间套作模式、丰富桑园间套作理论提供参考.

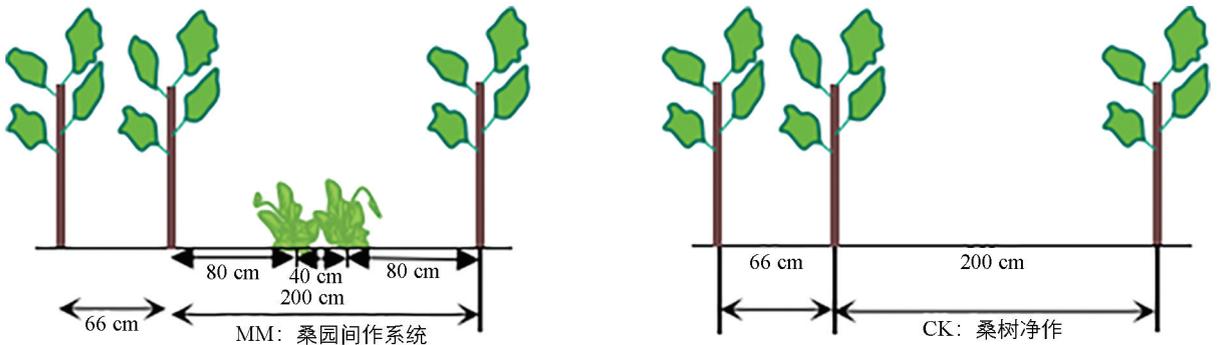
1 材料与方法

1.1 试验时间、地点及材料

试验于 2018—2019 年在宜宾市农业科学院大观研究基地进行, 地理坐标为 $28^{\circ}58'7''N$, $104^{\circ}54'54''E$, 海拔 310 m, 年降水量 1 072 mm, 无霜期 347 d, 年均气温 $17.9^{\circ}C$. 供试桑品种为“强桑 3 号”, 大豆品种为“南豆 12”, 花生品种为“天府三号”, 甘薯品种为本地红皮薯, 马铃薯品种为“川芋 117”. 2018 年土壤基础情况为: pH 值为 7.92, 有机质含量为 23.92 g/kg, 全 N 含量为 1.42 g/kg, 全 P 含量为 0.5 g/kg, 全 K 含量为 21.5 g/kg.

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计, 以桑树净作(CK)为对照、设置了桑树间作大豆(MS)、桑树间作花生(MP)、桑树间作甘薯(MSt)和桑树间作马铃薯(MPt)共 5 种植植模式, 重复 3 次, 每个处理种 3 带, 带长 8 m, 带宽 2.66 m, 宽行 200 cm, 窄行 66 cm, 小区面积 $21.28 m^2$. 种植模式如图 1 所示, 桑树间作和桑树净作均采用宽窄行种植, 桑树窄行距 66 cm, 宽行距 200 cm, 株距 50 cm, 穴留 1 株, 密度 1.49 万株/ hm^2 ; 间作作物与桑树之间行距 80 cm, 间作作物之间行距 40 cm, 穴距均为 17 cm, 穴留 2 株, 密度 8.74 万株/ hm^2 , 甘薯和马铃薯均在宽行起垄播种. 桑树施用氮肥, 间作作物氮肥作底肥一次性施完, 间作作物磷钾肥与底肥随施, 施用量为 P_2O_5 100.05 kg/ hm^2 , K_2O 135.00 kg/ hm^2 . 2017 年 12 月种植桑树. 2018 年 12 月 12 日播种马铃薯, 次年 4 月 9 日收获; 2019 年 5 月 10 日播种大豆、花生, 10 月 10 日收获; 5 月 22 日播种甘薯, 10 月 23 日收获.



MM: 桑园间作系统; CK: 桑树净作, 下同.

图 1 不同种植模式示意图

1.3 样品采集及测定

1.3.1 土壤样品采集

2018—2019 年于作物播种期、盛花期、块根形成期和成熟期, 避开施肥点, 取间作带中靠近桑树处 0~20 cm 土样和桑树窄行 0~20 cm 土样, 每区取 3 穴, 并将取得的土样整碎混匀以 4 分法取样, 除去根系、动植物残体和石块等杂物, 自然风干粉碎后过 60 目筛用于土壤理化性质测定. 每个处理重复 3 次.

1.3.2 土壤理化性质测定

相关土壤指标测定参照鲍士旦^[17]的方法. 其中, 采用电位法测定土壤 pH 值, 凯氏定氮法测定土壤全氮含量, 马弗炉-钼锑抗比色法测定土壤全磷含量, 马弗炉-火焰风光光度法测定土壤全钾含量, 重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量. 每个处理重复 3 次.

1.3.3 产量及产值

每小区选 5 株桑树测量其摘叶量和总产叶量; 甘薯、马铃薯产量成熟期测地下块根产量; 大豆、花生成熟期选取长势一致的植株 8 株, 人工脱粒自然风干后称量小区籽粒产量, 最终计算产量.

间作作物产值 = 作物产量 × 作物价格

桑园间作体系增加收益 = 间作作物产值 - 间作成本

1.3.4 间作系统的种间竞争能力指标

1) 土地当量比

$$R_{LER} = L_i + L_m$$

式中: L_i 为间作物间作时产量与间作物净作时产量的比值; L_m 为桑树间作时桑叶产量与桑树净作时桑叶产量的比值; 当 $R_{LER} > 1$ 时, 表示间作系统有产量优势; 当 $R_{LER} < 1$ 时, 表示间作系统无产量优势^[3,18].

2) 种间相对竞争能力^[19]

$$A_{xc} = (A_{ix}/A_{sx}) - (A_{im}/A_{sm})$$

式中: A_{xc} 为间作物相对于桑树的竞争能力; A_{ix}, A_{im} 分别为间作物、桑树在间作时籽粒或块根的产量; A_{sx}, A_{sm} 分别为间作物、桑树在净作时的桑叶产量; 当 $A_{xc} > 0$ 时, 表示间作物竞争能力强于桑树; 当 $A_{xc} < 0$ 时, 表示间作物竞争能力弱于桑树.

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理和作图. 用 DPS 7.05 进行方差分析(LSD法), 显著性水平设定为 $p = 0.05$.

2 结果

2.1 不同种植模式下桑园土壤理化性质

如图2所示, 4种间作模式下土壤pH值为7.5~8.5, 属于碱性土壤. 对比各模式在播种期到成熟期的变化情况, 马铃薯CK及MPt、MSt两种耗地间作模式土壤pH值随生育时期呈线性上升趋势, 分别提高了4.34%和9.17%; 共生前, 桑树净作土壤与间作土壤pH值存在差异, 为净作大于间作; 共生后, 间作土壤的pH值逐渐增加, 至成熟期净作小于间作. MS和MP两种养地间作模式土壤pH值随生育时期的变化呈先增加后减少趋势, 最终减少了2.37%和0.39%. 桑园间作模式共生期划分如图3所示.

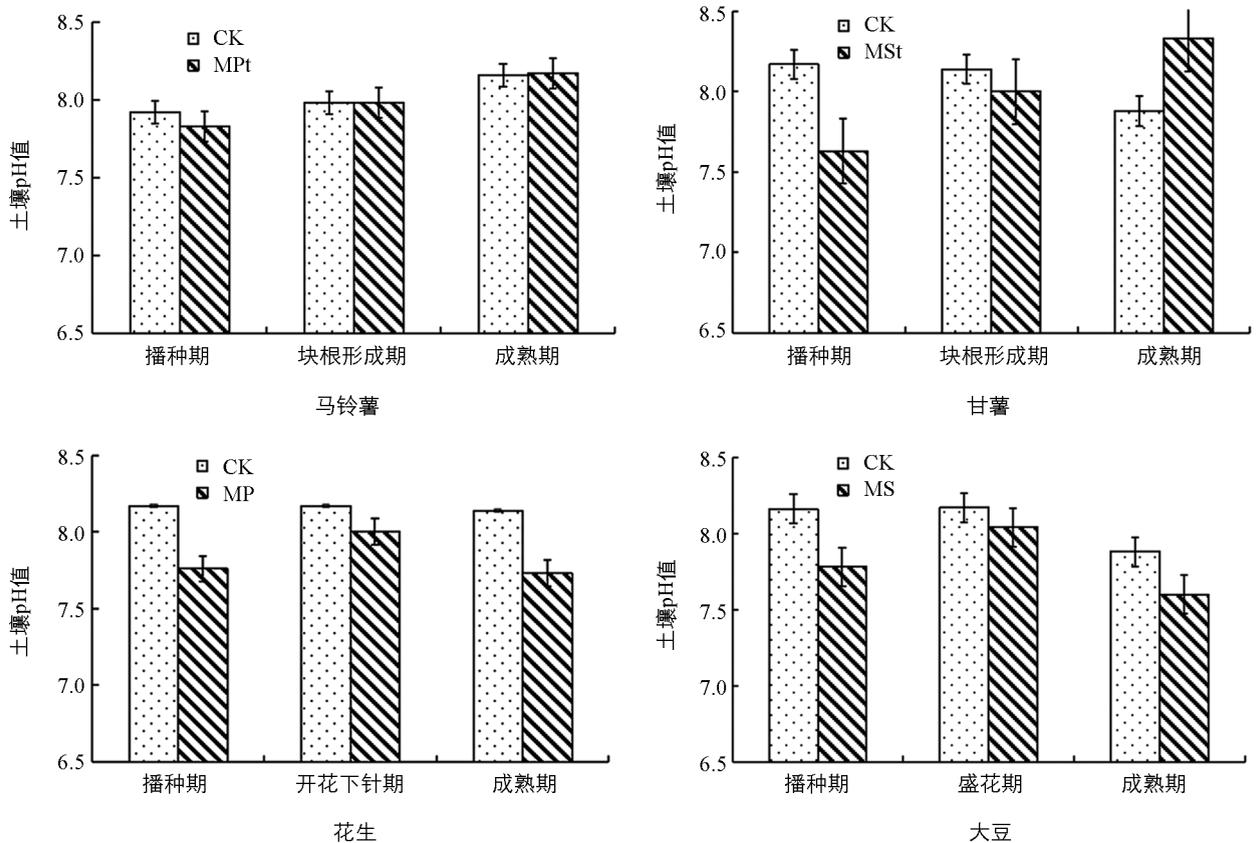


图2 不同间作模式下土壤pH值



图 3 桑园间作模式共生期划分

表 1 不同时期各桑树间作模式下土壤养分含量

g · kg⁻¹

种植模式	播种期			盛花期/块根形成期			成熟期		
	全氮	全磷	全钾	全氮	全磷	全钾	全氮	全磷	全钾
CK-MS	1.47abc	0.49b	19.33bc	1.25d	0.44b	19.96b	1.47b	0.5b	19.13ab
CK-MP	1.39abc	0.49b	19.85b	1.25d	0.44b	19.96b	1.44b	0.48b	19.79ab
CK-MSt	1.47abc	0.49b	19.33bc	1.44b	0.49b	19.41bc	1.47b	0.5b	19.13ab
CK-MPt	1.5a	0.52ab	21.73a	1.33c	0.8b	21.09a	1.47b	0.49b	19.63ab
MS	1.31c	0.49b	18.65c	1.45b	0.51b	19.61bc	1.32c	0.56a	19.03b
MP	1.48ab	0.51ab	19.54b	1.42b	0.59a	19.45bc	1.65a	0.51ab	19.59a
MSt	1.49ab	0.59a	19.28bc	1.63a	0.5b	19.01c	1.32c	0.54ab	19.44ab
MPt	1.37bc	0.49b	21.16a	1.36c	0.45b	20.87a	1.48b	0.48b	19.36a

注：表中数据为 3 次重复的平均数，同一列中不同字母表示差异达 5% 显著水平。下同。

从表 1 可以看出，桑园土壤养分含量在不同种植模式间存在显著差异。各间作模式下 CK 处理的全氮含量表现为先降低后增加趋势，至作物共生结束，各间作模式下仅 MSt 的土壤全氮含量比共生前低 11.41%，其余处理均有增加，其中 MP 增加了 11.49%。在桑树与间作物共生第一阶段，MSt, MPt 土壤全磷含量减少，MS, MP 土壤全磷含量增加；在共生第二阶段，MSt, MPt 的土壤全磷含量减少，MS 增加；共生结束后，MSt, MPt 的土壤全磷含量分别降低了 5.56%，2.04%，MS 增加了 14.29%，说明在 4 种间作物中，甘薯、马铃薯的磷需求量高，消耗大。各对照处理的土壤全钾含量除 MPt 线性递减外，均随生育期的推进呈先增后减趋势；间作处理除 MPt 土壤全钾含量最终降低 8.5% 外，其余处理均增加。

2.2 不同种植模式下桑园产量情况

如表 2 所示，各间作种植模式桑叶产叶量并没有因多种植一种作物而显著降低，间作后桑园桑叶的平均总产量比净作桑园桑叶平均总产量高 17.72%，不同间作模式平均总产量从大到小依次为 MSt, MS, MPt, MP；与 CK 相比，MS, MSt, MPt 的桑叶产量分别提高了 32.90%，35.50%，13.05%，MP 的桑叶产量降低了 10.55%。间作显著提高了 MS, MSt, MPt 的系统产量，MP 处理下的系统产量降低未达到显著水平。

表 2 不同桑园种植模式产量

kg · hm⁻²

模式	桑叶产量				间作物产量	系统产量
	春	夏	秋	总产量		
CK	6 768.0bc	11 068.2c	10 439.6a	28 276.1ab	—	28 276.1c
MS	11 039.0a	17 351.9ab	9 186.8a	37 577.6a	1 333.1b	38 738.7b
MP	5 402.7c	14 528.0bc	5 362.8a	25 293.6b	811.7b	16 105.3c
MSt	9 640.1ab	20 480.0a	8 193.5a	38 313.5a	13 438.5a	51 751.95a
MPt	8 711.6abc	13 001.3bc	10 253.1a	31 965.9ab	13 161.0a	45 126.9ab

在桑园中发展不同的间作种植模式，有利于增加桑园的经济收入。如表 3 所示，不同间作模式的生产成本不同。本研究中，物质成本、人工成本和总成本从高到依次为：MSt, MPt, MP, MS；虽然间作产值从

高到低依次为: MSt, MPt, MP, MS, 纯收入从高到低依次为: MSt, MP, MPt, MS, 但产投比从高到低依次为: MS, MP, MSt, MPt.

表3 不同桑园间作模式生产成本、产值分析

模式	间作成本			产值/ (元·hm ⁻²)	纯收入/ (元·hm ⁻²)	产投比
	物质/ (元·hm ⁻²)	人工/ (元·hm ⁻²)	总成本/ (元·hm ⁻²)			
MS	1 391.1	2 625	4 016.1	7 331.9	3 315.8	1.8
MP	2 887.1	3 750	6 637.1	10 551.5	3 914.4	1.6
MSt	5 444.3	15 750	21 194.3	26 877.0	5 682.8	1.3
MPt	5 981.3	14 250	20 231.3	23 689.8	3 458.6	1.2

注:物质成本和人工成本参照本地农业生产资料的市场价格,根据本研究实际投入计算.

2.3 不同间作模式下桑园土地当量比及种间竞争力

与净作相比,虽然大豆、甘薯、马铃薯与桑树间作时产量有所降低,但在桑园桑叶产量不减少的情况下增加了间作物的产量,极大提高了桑园的土地当量比(表4),提高了桑园复种指数,间作模式的LER值均大于1,表示间作具有产量优势. MS, MSt, MPt的种间竞争力均小于0,表明在桑树间作大豆、桑树间作甘薯、桑树间作马铃薯间作系统中大豆、甘薯、马铃薯的种间竞争力小于桑树,桑树为其间作模式的优势作物;MP的种间竞争力大于0,表明花生的种间竞争力大于桑树,花生为MP间作模式的优势作物.

表4 不同桑园间作模式的土地当量比及种间竞争力

模式	籽粒(块根)产量/(kg·hm ⁻²)		桑叶产量/ (kg·hm ⁻²)	竞争力	LER值
	净作	间作			
CK	—	—	28 276.1	—	1
MS	2 489.1	1 333.1	37 577.6	-0.43	1.8
MP	785.6	811.7	25 293.6	0.25	1.54
MSt	37 803.6	13 438.5	38 313.5	-0.94	1.71
MPt	20 551.4	13 215.0	31 965.9	-0.36	1.77

2.4 不同种植模式桑园综合经济效益比较

本研究中,间作增加的收入为3 315.8~5 682.8元/hm²;除MP外,MS, MSt, MPt处理下的桑叶产量均高于CK,蚕桑生产中每15 kg桑叶可产1 kg蚕茧,若将MS, MSt和MPt增加的桑叶全部用于养蚕,将增加农户养蚕张数,提高茧款收入.

3 讨论与结论

植物对土壤养分的利用效率与作物本身及其与周围环境所形成的根际环境相关,不同间作作物的根系分泌物、有机物料^[20]及间作系统的根系互作^[21]形成一定的微生物生态组^[22],参与土壤养分的转化和作物吸收^[23-24].

本研究中,不同种植模式显著影响了桑园土壤养分含量.在施肥水平相同的前提下,4种间作模式的土壤pH值、全氮、全磷、全钾含量表现出不同规律,说明不同间作物与桑园土壤养分之间的转化存在差异,而且养地间作模式和耗地间作模式的pH值变化规律相反.间作中MS, MP两种模式桑园土壤pH值较共生前降低,这一结论与前人对间作物根区土壤pH值的研究结果一致^[25];pH值降低使得土壤中难溶性元素活化,增加了MS, MP土壤中全氮、全磷、全钾含量,而MSt, MPt土壤pH值升高, MSt的全氮、全磷和MPt的全磷、全钾降低,这可能受到不同作物地下部根系分泌有机酸的速率、种类和地上部在荫蔽条件下光截获程度的影响,也与不同间作物对营养元素的吸收利用偏好和消耗有关,比如:在4种间作模式中, MSt土壤氮、磷的含量降幅最大, MS土壤全磷和全钾含量增幅最大,而MP土壤全氮含量增幅最大.

研究发现,大豆、豌豆、蚕豆等豆科与玉米、小麦、水稻等禾本科间套作后有提高间套作系统养分吸收,实现系统增产的优势,其他作物间套作后也能提高系统整体产量^[26],但在不同作物组合上有不同的表现^[27-28].适合的间作作物在生长资源的需求上具有互补性,种间的互利大于竞争,作物间的互作效果可以通过竞争力或侵占力来评价,如果一种作物的竞争力或侵占力太强,会导致物种间不均衡的竞争,并且会阻碍地上、地下部分的生长^[29],从而影响整个系统的生产性能^[30];如果两种作物对同一资源存在错位,就会降低作物间的竞争作用,甚至表现出一定的促进作用. LER 值^[18, 31]和种间竞争能力是^[19]衡量间套作体系优势的重要指标,前人研究表明,多种合理间套作体系的 LER 值均大于 1,具有间套作优势^[3, 32-34],这与本研究的结果一致,即与净作相比,间作提高了桑园的土地利用效率. 4 种间作模式中,除 MP 外,桑树在其他模式中都是间作中的优势作物,竞争能力强于间作物,不会影响桑叶产量,这与前人研究结果一致^[34],并与本研究中各间作模式的桑叶产量结果相印证.

间套作模式所形成的群体经济效益是评价间套作成功与否的重要指标.大豆、甘薯和马铃薯与桑树间作后,由于占据生态位优势的桑树对劣势作物造成荫蔽,使大豆、甘薯和马铃薯产量较净作有所降低,但总体增加了系统间作物收益,增加了桑叶产量,最终表现出间作经济效益系统优势;而花生与桑树间作后,花生产量较净作增加,桑叶产量减少.

本研究的结果初步表明,不同间作模式下桑园土壤养分含量、间作群体产量和系统经济效益均存在差异.两种养地间作模式降低了土壤 pH 值,并提高了土壤全氮含量,能够将土壤肥力维持在较高水平;在桑园中间作大豆、甘薯、马铃薯均能增加系统桑叶产量和系统总产量,提高桑园土地利用效率,其中间作甘薯的单位面积纯收入最高,间作大豆的产投比最高.综合考虑土壤养分含量、产投比、LER 值和桑园综合经济效益等因素,在桑园中间作大豆具有更高的土壤可持续性和经济推广价值.

参考文献:

- [1] 吕鸿声. 蚕种学原理 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011.
- [2] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7082-7090.
- [3] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及其种间竞争力的评定 [J]. 草业学报, 2012, 21(1): 50-58.
- [4] 周丽, 付智丹, 杜青, 等. 减量施氮对玉米/大豆套作系统中作物氮素吸收及土壤氨氧化与反硝化细菌多样性的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(6): 1076-1087.
- [5] 张晓娜, 陈平, 杜青, 等. 玉米/大豆、玉米/花生间作对作物氮素吸收及结瘤固氮的影响 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1183-1194.
- [6] 寸植贤, 陈建斌, 秀洪学, 等. 间作方式和种植密度对蚕豆结瘤和作物生长的影响 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2014, 29(4): 514-520.
- [7] 赵德强, 李彤, 侯玉婷, 等. 玉米大豆间作模式下干物质积累和产量的边际效应及其系统效益 [J]. 中国农业科学, 2020, 53(10): 1971-1985.
- [8] 李巧玲, 肖忠, 安杰, 等. 不同间作模式对田间杂草防控及栀子产量的影响 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(3): 172-178.
- [9] ZUO Y M, ZHANG Z J, LIU C H, et al. Achieving Food Security and High Production of Bioenergy Crops through Intercropping with Efficient Resource Use in China [J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2015, 2(2): 134-143.
- [10] 卢秉林, 车宗贤, 包兴国, 等. 不同氮肥减施量下玉米针叶豌豆间作体系的产量及效益 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9): 1560-1570.
- [11] 雍太文, 陈小容, 杨文钰, 等. 小麦/玉米/大豆三熟套作体系中小麦根系分泌特性及氮素吸收研究 [J]. 作物学报, 2010, 36(3): 477-485.
- [12] 李鑫, 王剑, 李亚兵, 等. 不同间套作模式对棉花产量和生物量累积、分配的影响 [J]. 作物学报, 2022, 48(8): 2041-2052.

- [13] 雍太文,杨文钰,向达兵,等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作对根际土壤细菌群落多样性及植株氮素吸收的影响 [J]. 作物学报, 2012, 38(2): 333-343.
- [14] 苏本营,陈圣宾,李永庚,等. 间套作种植提升农田生态系统服务功能 [J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4505-4514.
- [15] 邓文,胡兴明,于翠,等. 桑树间作大豆对桑园土壤微生物多样性的影响 [J]. 蚕业科学, 2015, 41(6): 997-1003.
- [16] 胡举伟,朱文旭,许楠,等. 桑树/大豆间作对其生长及光合作用对光强响应的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(2): 44-49.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] LI L, YANG S C, LI X L, et al. Interspecific Complementary and Competitive Interactions between Intercropped Maize and Faba Bean [J]. *Plant and Soil*, 1999, 212(2): 105-114.
- [19] ZHANG F S, LI L. Using Competitive and Facilitative Interactions in Intercropping Systems Enhances Crop Productivity and Nutrient-Use Efficiency [J]. *Plant and Soil*, 2003, 248(1): 305-312.
- [20] 金亚波,寇智瑞,韦建玉,等. 有机物料对黄壤烟田土壤团聚体组成及土壤肥力的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(8): 9-16.
- [21] 黄营,吴强,邓姝玥,等. 两种间作模式对玉米根系生长、叶片光合特性及生物量的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2020, 38(5): 513-519, 527.
- [22] FREY B, STEMMER M, WIDMER F, et al. Microbial Activity and Community Structure of a Soil after Heavy Metal Contamination in a Model Forest Ecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(7): 1745-1756.
- [23] 李奇松,雷卫星,刘江西,等. 间作麦冬对茶园土壤理化性质及微生物群落结构的影响 [J]. 南方农业学报, 2021, 52(12): 3366-3374.
- [24] 毛璐,宋春,徐敏,等. 栽培模式及施肥对玉米和大豆根际土壤磷素有效性的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(12): 1502-1510.
- [25] 张德闪,王宇蕴,汤利,等. 小麦蚕豆间作对红壤有效磷的影响及其与根际 pH 值的关系 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 127-133.
- [26] 杨欢,周颖,陈平,等. 玉米-豆科作物带状间套作对养分吸收利用及产量优势的影响 [J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1476-1487.
- [27] 刘广才,杨祁峰,李隆,等. 小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 477-484.
- [28] 郭秀芝,彭政,王铁霖,等. 间套作体系下种间互作对药用植物影响的研究进展 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(9): 2017-2022.
- [29] 赵林,李保平,孟玲,等. 不同氮、磷营养水平下紫茎泽兰和多年黑麦草苗期的相对竞争力(简报) [J]. 草业学报, 2008, 17(1): 145-149.
- [30] CRAWLEY M J. *Plant Ecology* [M]. 2nd ed. Oxford: Blackwell Science, 1997.
- [31] WILLEY R W. Intercropping - Its Importance and Research Needs. 1. Competition and Yield Advantages [J]. *Field Crop Abstracts*, 1979, 32(1): 1-10.
- [32] 焦念元,宁堂原,赵春,等. 施氮量和玉米-花生间作模式对氮磷吸收与利用的影响 [J]. 作物学报, 2008, 34(4): 706-712.
- [33] 宁堂原,苏琳,焦念元,等. 不同施氮水平下春夏玉米套作对全株饲用营养价值的影响 [J]. 中国农业科学, 2006, 39(10): 2042-2047.
- [34] 雍太文,刘小明,宋春,等. 种植方式对玉米-大豆套作体系中作物产量、养分吸收和种间竞争的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 659-667.