



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

不同间作方式对玉米/大豆的光合性能、产量和土壤微生态特征的影响

雷雲翔, 陆思豪, 应晓成, 沈新平, 蒋敏

引用本文:

雷翔, 陆思豪, 应晓成, 沈新平, 蒋敏. 不同间作方式对玉米/大豆的光合性能、产量和土壤微生态特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 610–618.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0819>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

间作促进作物磷吸收的氮素调控效应

钱韩玲, 朱启林, 周龙, 龙光强, 汤利

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 471–479 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0108>

坡耕地不同种植模式对农田水土保持效应及土壤养分流失的影响

马传功, 陈建军, 郭先华, 何晓彤, 祖艳群, 李元

农业资源与环境学报. 2016, 33(1): 72–79 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0170>

西北绿洲区间作模式对土壤团聚体组成及其有机碳含量的影响

孙涛, 冯晓敏, 赵财, 殷文, 胡发龙, 宋振伟, 张卫建

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 874–881 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0571>

施氮对间作条件下玉米、马铃薯根际微生物群落功能多样性的影响

覃潇敏, 郑毅, 汤利, 龙光强

农业资源与环境学报. 2015(4): 354–362 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0353>

间作大蒜对小麦根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响

孟自力, 叶美金, 闫延梅, 朱伟, 闫向泉, 朱倩, 倪雪峰

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 430–438 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0080>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

雷雲翔, 陆思豪, 应晓成, 等. 不同间作方式对玉米/大豆的光合性能、产量和土壤微生态特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 610–618.

LEI Y X, LU S H, YING X H, et al. Effects of different intercropping methods on photosynthetic performance, yield, and soil microecological characteristics of maize and soybean[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 610–618.

不同间作方式对玉米/大豆的光合性能、产量和土壤微生态特征的影响

雷雲翔^{1,2}, 陆思豪¹, 应晓成^{1,2}, 沈新平^{1,2}, 蒋敏^{1,2*}

(1. 江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室, 扬州大学农学院, 江苏 扬州 225009; 2. 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 扬州大学, 江苏 扬州 225009)

摘要:为研究不同间作方式对玉米和大豆两种作物土壤微生态、光合作用、产量和经济效益等方面的影响,本研究以大豆(绿领九号)和玉米(董浜黄金小玉米)为试验材料,设置玉米单作、大豆单作、玉米–大豆2:2间作和玉米–大豆2:4间作4个处理,每个处理3个重复,采用完全随机区组设计,研究两种农作物在不同处理下土壤养分、叶绿素含量和土地当量比(LER)等指标的变化。结果表明,与单作相比,不同间作处理下玉米、大豆植株的根际土壤养分含量和土壤酶活性提高,其中2:2间作下玉米过氧化氢酶活性显著提升36.96%,2:2间作下大豆脲酶活性显著提升44.24%。就玉米而言,2:2和2:4间作下的土壤水分利用效率分别提高21.9、30.6个百分点。玉米、大豆不同时期叶绿素活性均提高,两种作物群体产量和经济效益也明显提升,其中2:2间作下LER为1.40±0.21,2:4间作下LER为1.44±0.14。研究表明,玉米和大豆间作可活化土壤养分库,提高土壤酶活性,增加作物的叶绿素含量,提升系统的光合作用能力,从而提高间作系统产出和经济效益。

关键词:间作;根际土壤;叶绿素;土地当量比;经济效益

中图分类号:S513;S565.1 文献标志码:A 文章编号:2095–6819(2023)03–0610–09 doi: 10.13254/j.jare.2022.0819

Effects of different intercropping methods on photosynthetic performance, yield, and soil microecological characteristics of maize and soybean

LEI Yunxiang^{1,2}, LU Sihao¹, YING Xiaocheng^{1,2}, SHEN Xinping^{1,2}, JIANG Min^{1,2*}

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Jiangsu Provincial Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology, Agricultural College of Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: To study the effects of different intercropping methods on soil microecology, photosynthesis, yield, and the economic benefits of maize and soybean crops. Soybean (Green Collar No.9) and corn (Dongbang golden small corn) were used as the experimental plants. Four treatments, each with three replicates, were set up: maize monocropping, soybean monocropping, corn–soybean 2:2 intercropping, and corn–soybean 2:4 intercropping. The variations in soil nutrients, chlorophyll content, and land equivalent ratio (LER) of the two crops under different treatments were investigated using a completely random block design. The findings demonstrated that different intercropping treatments increased the rhizosphere soil nutrients and soil enzyme content of maize and soybean plants in comparison to monocropping, with the content of catalase in maize significantly increasing by 36.96% under 2:2 intercropping and the content of urease in soybean increasing by 44.24% under 2:2 intercropping. For maize, soil water use efficiency under 2:2 and 2:4 intercropping increased by 21.9 and

收稿日期:2022–11–16 录用日期:2023–01–05

作者简介:雷雲翔(1996—),男,河南郑州人,硕士研究生,研究方向为农业生态、农业管理。E-mail:mz120211333@stu.yzu.edu.cn

*通信作者:蒋敏 E-mail:jiangmin@yzu.edu.cn

基金项目:江苏现代农业产业技术体系建设专项资金(JATS[2021]126, JATS[2022]131);江苏省高校自然科学基金(21KJA210001)

Project supported: The Earmarked Fund for Jiangsu Agricultural Industry Technology System(JATS[2021]126, JATS[2022]131); The Natural Science Foundation of the Higher Education Institutions of Jiangsu Province, China(21KJA210001)

30.6 percent points, respectively. The chlorophyll content of corn and soybean increased at different stages. The yield and financial gains of the two crop groups were significantly increased; the LER under 2:2 intercropping and 2:4 intercropping were 1.40 ± 0.21 and 1.44 ± 0.14 , respectively. This study has shown that maize-soybean intercropping can activate the soil nutrient pool, improve soil enzyme activity, increase the chlorophyll content of crops, and improve the photosynthesis capacity of the system, thereby improving the output and economic benefits of the intercropping system.

Keywords: intercropping; rhizosphere soil; chlorophyll; land equivalent ratio; economic benefit

全国第七次人口普查结果显示,我国总人口已达14.13亿。人口和土地之间的矛盾日益突出,粮食安全已成为社会关注的焦点。因此,如何在有限的土地上实现粮食作物增产增收成为亟需解决的一个重要问题。作物间作既可以提高光、热、水、肥资源在农田方面的利用效率,还可以控制农田病虫害,提高农田系统生产力^[1-3]。间作是一种环境友好、可持续的农业生产模式,正被越来越多的生产者所接受和采用^[4]。通过对禾本科和豆科间作的作物产量及土地生产能力的研究发现,不同时期的间作作物的光、温、水资源的分配与利用发生了变化,从而影响到间作作物的产量和生产能力^[5-7]。研究结果显示,玉米和大豆间作系统可以改善作物的光合作用和养分吸收^[8],从而提高作物的生物量和产量,显示出较强的生产力^[9]。过度使用现代农药和单一耕作等方法造成了生物多样性的降低和生态服务功能的减弱^[10]。国内外研究表明,间作不但可以提高产量,而且可以降低病虫害,减少农药的使用^[11-12],改善土壤肥力,增强水土保持作用^[13-14]。种间互作是导致根际微生物结构与功能发生变化^[15-16]的根本原因,也是导致间作效应的重要微生物机理之一^[16]。同时分析根际微生物的结构与功能,对于了解根际微生物作用机理具有重要意义。Li等^[17]、Mao等^[18]和Chen等^[19]发现,间作作物能有效利用土壤中的养分和水分,促进植物根系的生长。赵建华等^[20]发现在玉米荫蔽作用下,大豆的光合能力明显下降,导致产量降低。张晓娜等^[21]的试验结果显示,间作能增加玉米的干物质积累量,增加籽粒分配率;崔亮等^[22]的研究表明,间作可以增加大豆的干物质分配,但作物干物质的积累和分布规律仍需进一步探讨。玉米和大豆间作是禾本科植物与豆科

植物间作的一种方式,尽管该类研究非常广泛,但对于大规模种植下,不同间作方式及密度对土壤微生态和经济效应的影响研究却很少。2022年农业农村部重点实施大豆油料等作物的扩种行动,并印发《关于做好2022年大豆油料扩种工作的指导意见》(农农发〔2022〕2号),将大豆、玉米带状复合种植作为主推技术,在全国新增推广面积1 500多万亩(1亩=1/15 hm²)。本研究在此背景下研究和探讨不同间作条件对两种作物根际土壤养分、光合性能、产量和经济效益等方面的影响,旨在为玉米、大豆带状复合种植的大规模推广提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2021—2022年在江苏省常熟市董浜试验基地进行,试验地地势平坦,排灌方便,土质土壤肥力较好。试验地前茬为水稻,土壤理化性质见表1,气候条件如图1所示。

1.2 试验设计

试验共设置4个处理,每个处理3次重复,采用完全随机区组排列。小区规格为10 m×5 m。供试玉米品种为董浜黄金小玉米,大豆品种为绿领九号。处理设置如下:玉米单作(T1),行距50 cm,株距35 cm;大豆单作(T2),行距50 cm,株距12 cm;玉米-大豆2:2间作(T3),玉米行距40 cm、株距18 cm,大豆行距30 cm、株距8 cm,条带间距60 cm;玉米-大豆2:4间作(T4),玉米行距40 cm、株距14 cm,大豆行距30 cm、株距12 cm,条带间距60 cm。玉米种植密度为6万株·hm⁻²,大豆种植密度为13.5万株·hm⁻²。

化肥施用方式如下:播前施用底肥,有机肥22.5

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soils

pH	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline hydrolyzable nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)
7.35	25.49	1.49	94.68	7.85	84.63

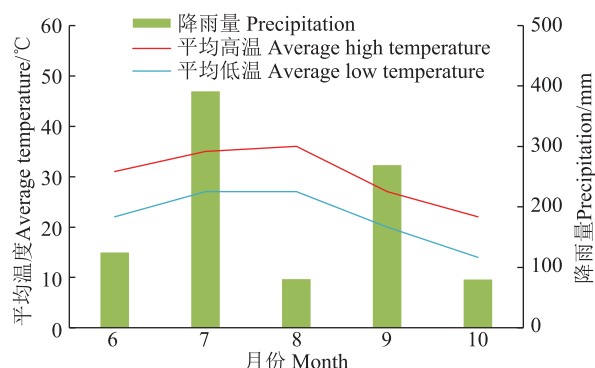


图1 2022年6—10月的气候变化

Figure 1 Climate change from June to October 2022

$t \cdot \text{hm}^{-2}$ 和进口复合肥 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} (\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O})$,玉米分别于大喇叭口期和吐丝期各追施氮肥 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。农田管理与当地相同。

2022年7月10日灭茬旋耕,并撒施三元复合肥($\text{N}, \text{P}_2\text{O}_5, \text{K}_2\text{O}$ 含量均为15%) $500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作底肥;7月13日人工开沟播种,7月20日出苗;8月4日对玉米和大豆进行间苗、定苗;7月22日玉米追施三元复合肥(N 含量30%, $\text{P}_2\text{O}_5, \text{K}_2\text{O}$ 含量均为5%) $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,大豆不追肥;除草方式为人工除草;9月26日收获大豆,9月27日收获玉米。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根际土壤理化性质

在大豆鼓粒期和玉米成熟期,采用振荡法采集大豆和玉米根际土壤样品。在每个处理区域的中间行随机选择2个采样点,每个采样点取3株作物,将每个采样点的根际土壤制成混合样品^[23]。获得的样品立即带回实验室,去除动植物残体和石块,过1 mm筛。一部分样品于4℃保存,用于测定土壤酶活性;另一部分烘干后过0.3 mm筛,用于测定N、P和K元素。

土壤营养元素(N、P、K)和土壤酶活性的测定参考关松荫^[24]的方法。土壤水解氮含量采用碱水解扩散法测定,全氮含量采用重铬酸钾-硫酸消解法测定,速效钾和全钾含量采用火焰光度法测定,用氢氧化钠熔融-钼锑电阻比色法测定速效磷和全磷的含量。过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定,脲酶活性用苯酚-次氯酸钠比色法测定。转化酶活性用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,酸性磷酸酯单酯酶活性用对硝基苯酚比色法测定,过氧化物酶活性用比色法测定。

1.3.2 土壤水分利用效率

水分利用效率(E_{WU})^[25]为作物产量($Y, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)与

农田耗水量($T_{\text{E}}, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的比值,即:

$$E_{\text{WU}} = Y/T_{\text{E}} \quad (1)$$

根据农田水量平衡原理,可以计算 T_{E} 值:

$$T_{\text{E}} = W_{\text{播前}} - W_{\text{收获}} + I + P + G \quad (2)$$

式中: $W_{\text{播前}}$ 为播前土壤贮水量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $W_{\text{收获}}$ 为收获期土壤贮水量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; I 为生育期灌水量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; P 为生育期降水量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; G 为作物利用地下水量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.3.3 叶绿素含量

分别于玉米大喇叭口期、开花期、成熟期和大豆结荚期、鼓粒期、成熟期测定叶绿素含量。选取代表性植株10株。采用SPAD-502仪检测植株穗上叶、穗位叶、穗下叶的叶绿素相对平均值。测量时避开叶脉的位置,取平均值。

1.3.4 干物质积累量

在大豆的分枝期、花荚期、鼓粒期和玉米的拔节期、抽雄期、灌浆期分别测定干物质积累量,每个小区取生长发育一致的3株玉米和大豆植株,置于105℃烘箱杀青1 h, 85℃烘干至恒质量,分别测定玉米和大豆地上部干物质质量。

1.3.5 样品的测定

在玉米和大豆成熟期,每个地块指定10 m²的测产区。从每块玉米地块随机选择采摘10穗,测量轴厚、轴质量、行数和每行粒数等指标。从每块大豆地块中随机选择10株,测量主茎节间长度、每株荚数和每株有效粒数等指标。

1.3.6 产量及产出效益

群体产量为同一地块玉米与大豆产量之和。

土地当量比(Land equivalent ratio, LEA)是评价间作系统具有产量优势的重要指标^[26],为两种或多种作物间作产量与相应单作产量比值的总和。具体计算公式如下:

$$E_{\text{m}} = \frac{Y_{\text{mi}}}{Y_{\text{m}}} \quad (3)$$

$$E_{\text{s}} = \frac{Y_{\text{si}}}{Y_{\text{s}}} \quad (4)$$

$$E = E_{\text{m}} + E_{\text{s}} \quad (5)$$

式中: $Y_{\text{m}}, Y_{\text{s}}$ 分别表示玉米和大豆在单作中的产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $Y_{\text{mi}}, Y_{\text{si}}$ 分别表示玉米和大豆在间作中的产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $E_{\text{m}}, E_{\text{s}}$ 分别表示玉米和大豆在间作中的土地当量比; E 表示间作系统的土地当量比。 $E > 1$,说明间作系统存在产量优势; $E < 1$,说明间作系统产量具有劣势。

1.4 数据分析

利用Excel 2013和SPSS 17.0等软件进行数据分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤微生态效应的影响

2.1.1 大豆和玉米根际土壤N、P、K含量

不同处理对玉米根际土壤N、P、K含量影响见表2。其中,在全氮和速效氮方面,T3处理较T1、T4处理显著提高,且T3与T1相比,全氮和速效氮含量分别增加了5.12%和15.08%。在全磷和速效磷方面,T4处理较T1、T3处理显著降低。在全钾方面,T3处理较T1、T4处理显著降低;在速效钾方面,各处理之间存在显著性差异,表现为T3>T4>T1,且T3、T4较T1相比,速效钾含量分别增加了56.35%和27.93%。

不同处理对大豆根际土壤N、P、K含量影响见表2。在全氮方面,T3处理与T2处理之间存在显著差异,且T3与T2相比,全氮含量下降14.02%,而T4处理与T2处理之间无显著差异;在速效氮方面,各处理之间存在显著差异,且T3处理速效氮含量最高。在全磷方面,T3、T4处理较T2处理显著降低;在速效磷方面,各处理之间存在显著差异,表现为T3>T2>T4,且T3处理的速效磷含量较T2增加了33.06%。在全钾和速效钾方面,T3与T2处理全钾含量无显著差异,但T3处理速效钾含量较T2处理显著增加51.07%。

2.1.2 玉米和大豆根际土壤酶活性

土壤酶^[27]是具有高度专性催化作用的蛋白质,酶活性对土壤肥力起着至关重要的作用。土壤酶主要包括氧化还原酶、磷酸盐单酯酶、脲酶、蔗糖酶等^[27-29]。过氧化氢酶^[27]是一种常见的氧化还原酶,它

能加速过氧化氢对土壤中有机的氧化。土壤磷酸盐单酯酶^[27]与土壤中有机磷的矿化和植物的磷素养分密切相关。脲酶催化的产物氨是与土壤氮代谢有关的一种生物氮源^[28]。土壤蔗糖酶^[29]可促进蔗糖水解,产生葡萄糖、果糖,提高土壤中的可溶性养分,为土壤生物提供能量。

不同处理对玉米根际土壤酶活性的影响见表3。从过氧化氢酶活性来看,T3、T4较T1处理分别显著提高了36.96%和35.99%($P<0.005$)。从酸性磷酸单酯酶活性来看,T3>T1>T4,T3较T1处理显著提高16.30%,T4较T1处理显著降低15.11%。从脲酶活性来看,T3较T1处理显著提高11.66%。从蔗糖酶活性来看,T4较T1处理显著降低了41.98%。

不同处理对大豆根际土壤酶活性的影响见表3。由表3可以发现,T4、T3四种酶的活性较T2处理均有提升。其中:T3过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶较T2处理分别显著提高23.42%、44.24%和41.18%;T4处理酸性磷酸单酯酶和脲酶的活性较T2分别显著提高13.45%和31.04%。

2.1.3 土壤水分利用效率

水分利用效率可以反映植物生产过程中的能量转化效率^[25],是评价水分亏缺下植物生长适宜度的综合指标之一。由表4可知,玉米的水分利用效率远高于大豆。其中,T4、T3玉米的水分利用效率比T1分别显著增加30.6、21.9个百分点,而耗水量相差不大。从大豆的水分利用效率来看,T4比T3处理显著增加1.90个百分点,各处理之间耗水量相差不大。

2.2 不同处理对光合性能、产量的影响

2.2.1 大豆和玉米叶片SPAD值

叶绿素相对含量(SPAD值)作为植物光合作用的

表2 不同处理对玉米和大豆根际土壤N、P、K含量的影响

Table 2 Effects of different treatments on contents of N, P, and K in rhizosphere soils of maize and soybean

处理	全氮	全磷	全钾	速效氮	速效磷	速效钾	
Treatment	Total N/(g·kg ⁻¹)	Total P/(g·kg ⁻¹)	Total K/(g·kg ⁻¹)	Available N/(mg·kg ⁻¹)	Available P/(mg·kg ⁻¹)	Available K/(mg·kg ⁻¹)	
T1	2.93±0.02b	0.61±0.04a	0.37±0.07a	130.21±3.22b	67.75±1.42a	14.18±1.42c	
T2	3.28±0.07A	0.38±0.02A	0.42±0.13A	36.46±2.32B	43.35±2.72B	14.43±0.88B	
T3	玉米	3.08±0.05a	0.61±0.01a	0.28±0.02b	149.85±1.06a	68.28±1.42a	22.17±2.33a
	大豆	2.82±0.11B	0.27±0.15B	0.44±0.23A	55.23±2.02A	57.68±3.72A	21.80±1.47A
T4	玉米	2.98±0.03b	0.47±0.22b	0.33±0.15a	131.80±4.02b	61.09±4.64b	18.14±1.85b
	大豆	2.91±0.13AB	0.25±0.21B	0.31±0.02B	29.18±1.04C	39.36±2.22C	13.40±1.49B

注:T1、T2、T3、T4分别表示玉米单作、大豆单作、玉米-大豆2:2间作、玉米-大豆2:4间作。同列不同的小写字母表示玉米在 $P<0.05$ 水平差异显著。同列不同的大写字母表示大豆在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

Note: T1, T2, T3, and T4 indicate corn monocropping, soybean monocropping, corn-soybean 2:2 intercropping, corn-soybean 2:4 intercropping, respectively. Different lowercase letters in the same column indicate a significant difference at the level of $P<0.05$ between maize treatment. Different capital letters in the same column indicate a significant difference at the level of $P<0.05$ between soybean treatment. The same below.

表3 不同处理对玉米和大豆根际土壤酶活性的影响

Table 3 Effects of different treatments on enzyme activities in maize and soybean rhizosphere soils

处理 Treatment	过氧化氢酶 Catalase/ (mg·g ⁻¹)	酸性磷酸单酯酶 Acid phosphatase/ (mg·g ⁻¹)	脲酶 Urease/ (mg·g ⁻¹)	蔗糖酶 Sucrase/ (mg·g ⁻¹)
T1	4.14±1.13b	5.03±0.76b	7.03±2.03b	3.24±1.66a
T2	5.21±1.36B	4.61±1.21B	7.12±2.21C	2.21±0.42B
T3 玉米	5.67±1.42a	5.85±0.42a	7.85±1.42a	2.26±0.65ab
大豆	6.43±1.05A	5.01±1.69AB	10.27±1.35A	3.12±1.42A
T4 玉米	5.63±1.24a	4.27±1.42c	7.31±1.11ab	1.88±1.13b
大豆	5.35±1.03B	5.23±1.43A	9.33±1.82B	2.63±1.00AB

表4 不同处理的水分利用效率

Table 4 Water use efficiency of different treatments

处理 Treatment	玉米 Maize		大豆 Soybean	
	耗水量 Water use/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency/%	耗水量 Water use/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency/%
T1	355.3±58.65a	31.5±2.65b		
T2			356.3±46.65a	6.86±4.56ab
T3	367.4±62.45a	53.4±2.76a	358.8±75.36a	5.99±6.62b
T4	366.4±54.57a	62.1±8.15a	343.4±44.45a	7.89±4.33a

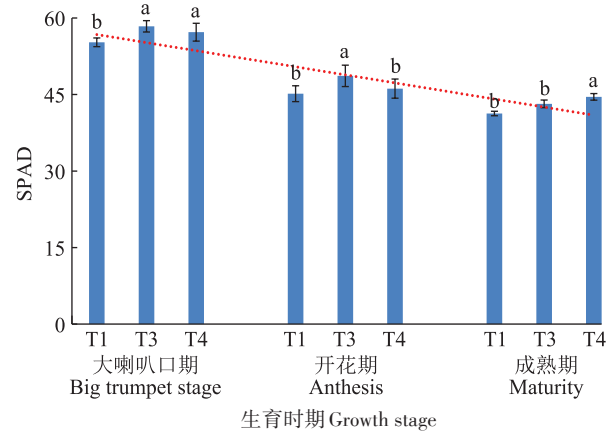
注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

重要指标^[8],其大小与植株干物质积累及产量的形成密切相关。

从图2可知,玉米在大喇叭口期、开花期和成熟期,间作均提高了玉米叶片的SPAD值,且随着玉米的生长,玉米叶片的SPAD值呈现下降的趋势。在大喇叭口期,T3和T4与T1相比,SPAD值分别显著提高了5.68%和3.62% ($P<0.05$),但T3和T4处理之间不存在显著差异。在开花期,T3和T4与T1相比,SPAD值分别提高了7.72%和2.21%,T3与T1、T4差异显著。在成熟期,T3和T4与T1相比,SPAD值分别提高了4.55%和7.90%,T4与T1、T3差异性达到了显著水平。结果表明,间作可以提高玉米叶片的叶绿素含量。

从图3可知,大豆在结荚期、鼓粒期、成熟期,间作均提高了大豆叶片的SPAD值,随着大豆的生长,大豆叶片的SPAD值呈现先上升后下降的趋势。在结荚期,T3和T4与T2相比,SPAD值分别提高了12.56%和14.98%,差异达到了显著水平,但T3和T4处理之间不存在显著差异。在鼓粒期,T3和T4与T2相比,SPAD值分别提高了6.86%和3.09%,T3与T2、T4差异性达到了显著水平。在成熟期,T3和T4与T2



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图2 不同处理对玉米叶片不同时期SPAD值的影响

Figure 2 Effects of different treatments on SPAD value of maize leaves at different growth stage

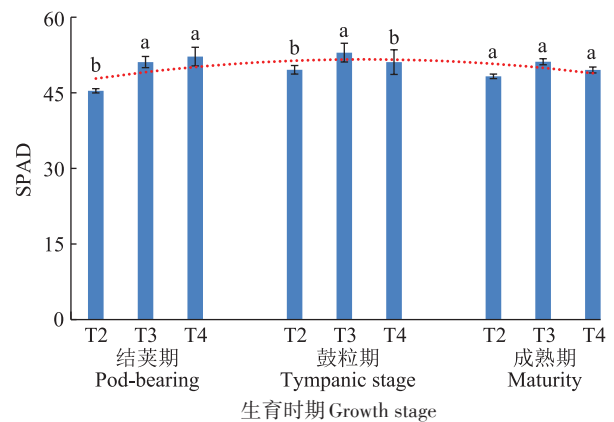


图3 不同处理对大豆叶片不同时期SPAD值的影响

Figure 3 Effects of different treatments on SPAD value of soybean leaves at different growth stage

相比,SPAD值分别提高了5.97%和2.61%,各处理之间差异不显著。结果表明,间作可以提高大豆叶片的叶绿素含量。

2.2.2 玉米和大豆干物质积累量

由表5可知,玉米拔节期,各处理之间干物质积累量无显著差异;抽雄期和灌浆期,T3比T1处理干物质积累量显著提高11.08%和9.06%。大豆分枝期,各处理之间干物质积累量无显著差异;大豆花荚期,T3较T2处理干物质积累量显著降低12.99%;大豆鼓粒期,T4、T3干物质积累量较T2处理显著降低14.50%和19.62%。

2.2.3 玉米和大豆产量构成

由表6可知,不同间作处理对玉米产量构成有影

表 5 不同处理对玉米和大豆各生育时期干物质积累的影响(g·株⁻¹)

Table 5 Effects of different treatments on dry matter accumulation of maize and soybean at each growth stage (g·plant⁻¹)

处理 Treatment	玉米 Maize			大豆 Soybean		
	拔节期 Jointing stage	抽雄期 Tasseling stage	灌浆期 Filling stage	分枝期 Branch stage	花荚期 Pod stage	鼓粒期 Drum stage
T1	26.4±3.88a	159.7±25.65b	293.7±57.65b			
T2				7.22±0.99a	11.78±2.31a	21.31±5.65a
T3	26.8±4.25a	177.4±19.65a	320.3±48.33a	7.08±1.65a	10.25±3.32b	17.13±3.45b
T4	27.4±5.12a	163.5±20.34b	288.4±39.51b	6.87±2.58a	11.14±0.85a	18.22±3.69b

响。间作处理下穗质量、穗长、穗粗、穗粒质量、轴粗、轴质量均高于单作且与单作具有显著差异。在穗质量上表现为 T4>T3>T1, T4、T3 较 T1 分别增加了 28.17% 和 23.00%; 穗长表现为 T3>T4>T1, T4、T3 较 T1 分别增加了 10.26% 和 14.74%; 穗粗表现为 T4>T3>T1, T4、T3 较 T1 分别增加了 8.52% 和 6.11%; 穗粒质量表现为 T4>T3>T1, T4、T3 较 T1 分别增加了 28.48% 和 21.85%, 且 T4 和 T3 处理之间也存在显著差异; 轴粗表现为 T4>T3>T1, T4、T3 较 T1 分别增加了 14.18% 和 10.64%; 轴质量表现为 T4>T3>T1, T4、T3 较 T1 分别增加了 39.46% 和 25.85%, 且 T4 和 T3 处理之间也存在显著差异。间作处理的行数、行粒数和秃尖长与单作无显著差异。

由表 7 可知,不同间作处理对大豆产量构成有影响。间作处理下主茎节间长度、单株荚数、单株有效粒数、单株总粒数和单株粒质量与单作具有显著差异。主茎节间长度表现为 T2>T3>T4, T4、T3 较 T2 分别降低了 8.59% 和 6.81%; 单株荚数表现为 T4>T3>

T2, T4、T3 较 T2 分别增加了 34.16% 和 16.25%; 单株有效粒数表现为 T4>T3>T2, T4、T3 较 T2 分别增加了 13.23% 和 10.45%; 单株总粒数表现为 T4>T3>T2, T4、T3 较 T2 分别增加了 31.94% 和 17.08%, 且 T3 与 T4 处理之间存在显著差异; 单株粒质量表现为 T4>T3>T2, T4、T3 较 T1 分别增加了 33.74% 和 25.77%。而在结荚长度、主茎节数方面,间作与单作之间不存在显著差异。

如表 8 所示,在间作条件下,玉米和大豆的百粒质量和籽粒产量较单作相比均有增加。T3、T4 处理较 T1 处理玉米的百粒质量分别显著增加 14.16% 和 12.41%。大豆百粒质量表现为 T4>T3>T2, 且 T4 处理较 T2 处理增加 13.73%。在籽粒产量方面, T3、T4 间作处理下的玉米籽粒产量为 T1 单作处理的 85% 和 91%, 说明在相同土地面积上间作玉米的产量高于单作, 具有较强的产量优势; 大豆籽粒产量 T3、T4 间作处理为 T2 单作处理的 55% 和 65%, 说明在相同土地面积上间作大豆的产量也高于单作。T3 处理下的土

表 6 不同间作方式对玉米产量构成的影响

Table 6 Effects of different intercropping methods on maize yield composition

处理 Treatment	穗质量 Ear weight/g	穗长 Ear length/cm	穗粗 Ear diameter/ cm	穗粒质量 Grain weight per ear/g	行数 Ear row number	行粒数 Grain number per row	轴粗 Cob diameter/ cm	轴质量 Cob weight/g	秃尖长 Barren tip length/cm
T1	213±58.65c	15.6±2.03b	4.58±0.14b	151±44.23c	16.4±1.21a	36.8±8.15a	2.82±0.12b	147±18.65c	0.30±0.01a
T3	262±32.42b	17.9±1.75a	4.86±0.74a	184±63.21b	16.6±2.08a	39.4±7.46a	3.12±0.30a	185±21.53b	0.38±0.01a
T4	273±42.15a	17.2±3.20a	4.97±1.21a	194±53.18a	16.3±2.65a	37.3±5.69a	3.22±0.45a	205±30.54a	0.35±<0.01a

表 7 不同间作方式对大豆产量构成的影响

Table 7 Effects of different intercropping methods on soybean yield composition

处理 Treatment	结荚长度 Length of podding/cm	主茎节间长度 Internode length/ cm	主茎节数 Nodes on main stem	单株荚数 Pods per plant	单株有效粒数 Effective grain number per plant	单株总粒数 Grain number per plant	单株粒质量 Grain mass per plant/g
T2	54.6±8.95a	67.5±10.21a	15.8±1.13a	36.3±4.21c	75.6±11.75b	72.0±2.30c	16.3±0.12b
T3	55.3±6.46a	62.9±6.35b	15.5±0.95a	42.2±4.11b	83.5±9.85a	84.3±5.75b	20.5±0.35a
T4	52.8±9.97b	61.7±4.55b	15.3±2.08a	48.7±3.26a	85.6±8.13a	95.0±5.65a	21.8±0.85a

表8 不同处理对间作玉米、大豆百粒质量、籽粒产量和土地当量比的影响

Table 8 Effects of different treatments on 100-grain weight, grain yield and land equivalent ratio (LER) of intercropping maize and soybean

处理 Treatment	百粒质量 100-grain mass/g		籽粒产量 Grain yield/(kg·hm ⁻²)		土地当量比 LER
	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	
T1	29.73±13.65b		2 023.85±58.45a		
T2		15.80±2.22b		637.88±41.15a	
T3	33.94±5.88a	16.58±4.10ab	1 720.27±78.93b	350.83±35.65c	1.40±0.21
T4	33.42±8.64a	17.97±1.58a	1 849.49±57.77b	414.62±40.33b	1.44±0.14

表9 不同种植方式对玉米、大豆产量和经济效益的影响

Table 9 Effects of different planting methods on the yield and economic benefits of maize and soybean

处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)			收入/(元·hm ⁻²) Income/(yuan·hm ⁻²)			投入/(元·hm ⁻²) Invest/(yuan·hm ⁻²)			经济效益/(元·hm ⁻²) Economic benefit/ (yuan·hm ⁻²)
	玉米 Maize	大豆 Soybean	群体产量 Population yield	玉米 Maize	大豆 Soybean	合计 Total	物资 Materials	用工 Employment	合计 Total	
T1	8 213±157.65a		8 213±157.65b	49 278		49 278	4 400	5 000	9 400	39 878±297.65b
T2		3 468±158.65a	3 468±158.65c		17 340	17 340	2 600	3 000	5 600	11 740±308.95c
T3	6 981±144.35b	1 907±138.35b	8 888±358.65a	41 886	9 535	51 421	3 600	7 400	11 000	40 421±558.15a
T4	6 488±258.65b	2 254±105.64b	8 742±448.65a	38 928	11 270	50 198	3 400	7 400	10 800	39 398±764.13b

注:黄金小玉米本年收购均价6元·kg⁻¹,大豆5元·kg⁻¹,每年收购价格因市场变化而不同。

Note: The average purchase price of golden small corn this year is 6 yuan·kg⁻¹, and soybean is 5 yuan·kg⁻¹, and the annual purchase price varies according to market changes.

地当量比为1.40±0.21, T4处理下的土地当量比为1.44±0.14,表明间作系统具有产量优势,间作对土地资源的利用效率更高。

2.2.4 作物总产量和经济效益

由表9可知,玉米和大豆的群体产量表现为T3>T4>T1>T2,其中T3较T1、T2、T4处理分别增加8.22%、156.28%、1.67%,T3处理对提高群体产量效果最好。

由表9可知,各处理经济效益表现为T3>T1>T4>T2,其中T3处理经济效益较T1、T2、T4分别显著提高1.36%、244.30%、2.60%,说明T3处理在保障玉米产量的同时,还可以提高大豆产量,增加经济效益。

3 讨论

土壤养分是土壤肥力的物质基础^[16],它的丰度与作物的生长和产量有密切的关系,是衡量土壤肥力水平的一个重要指标^[18]。不同间作方法对植物根系间的营养物质含量有一定的影响^[30]。本试验研究了不同处理对大豆和玉米根际土壤中的生理生化特性和酶活指标的影响,发现玉米与大豆间作体系存在明显的种间促进作用,其中玉米-大豆2:2间作方式对植株根际土壤的养分含量和多种土壤酶活性的提升效

果更好,说明2:2间作方式对土壤养分利用更为充分。而不同间作方式、土壤状况等对土壤微生物具有不同程度的影响。例如,Wang等^[31]的研究表明,在酸性土壤中小麦与油菜的间作可以使根际微生物群落结构发生变化,从而使土壤中的细菌和放线菌数量降低,而菌种的丰富程度随之提高。气候条件^[2]也是影响土壤的重要因素之一,雨水充沛地区的土壤状况适合耐涝作物的生长,干旱地区种植耐旱作物^[2]。因此,因地制宜选种作物对研究土壤养分也十分重要。

作物根系的空间分布是影响土壤水分竞争的关键因素^[2]。王子豪等^[25]的研究表明,玉米根的分布范围大于大豆,并且在干旱条件下,玉米根系不仅存在于间作条带间,还存在于大豆条带之间。本试验结果表明,玉米的水分利用率远高于大豆,且两种间作模式下玉米水分利用效率较单作相比分别提升21.9%、30.6个百分点,在2:2间作条件下,大豆的水分利用效率显著降低。这与Chen等^[19]的研究结果一致,但导致大豆水分利用效率降低的具体原因在本研究中还未涉及,比如天气、温度等因素^[14,18]对水分利用效率的影响机制,后续试验可展开研究和讨论。

叶绿素是植物生长的必需物质^[8],合理的空间分布有利于促进间作作物的生长,增加叶绿素含量,提

高光合能力^[20]。以往的研究表明,在大豆和非豆科植物的间作系统中,非豆科作物的叶绿素含量增加^[3,20]。本研究中,间作对提高叶绿素含量有较好的作用。这与高阳等^[8]的研究结果相吻合,再次印证了间作可以提高农作物光能的利用效率。而玉米和大豆对光能竞争的强弱是影响作物光合性能的关键因素^[3],比如大豆在玉米荫蔽作用下,光合能力明显下降^[20],这也是导致大豆光能利用率下降的主要原因之一。

干物质的积累和分布可以反映作物的生长和发育^[7,21],而间作可以通过影响土壤干物质的积累分布特性来影响作物的产量^[7,22]。本试验结果显示,与单作相比,间作处理的玉米在抽穗期、灌浆期干物质积累均有明显的增加。但与单作相比,大豆间作的干物质积累有所下降,这是种间竞争的结果。崔亮等^[22]发现,玉米间作对玉米和大豆的干物质积累和分布有一定的影响,而在种间竞争中,玉米对光照、水分、养分的竞争力要高于大豆。

土地当量比是评价耕地生产率的一个重要指标^[15],大多数的研究都认为间作可以增加土地当量比,但在不同的生态类型地区,不同作物、不同带宽的间作系统中土地生产率也不同。高砚亮等^[32]研究的玉米(M)与花生(P)间作的试验结果显示,2M:4P、4M:4P的土壤当量比在1.10~1.24之间,具有显著的间作优势。本试验中,2:2和2:4两种间作方式均促进了植株干物质积累和农作物的产量,且两种间作方式下的土地当量比均在1.4左右,在产量构成方面间作也优于单作,这是由于间作可以提高干物质积累量,而干物质积累对产量的提高至关重要^[21]。本研究中,2:2间作方式显著提高了经济效益,较玉米单作、大豆单作分别提升了1.36%和244.30%。在2:2间作下,玉米和大豆的群体产量显著提高,这对经济效益的提升也起到了重要的作用,但从生态角度来考量^[3,11,14],2:4间作方式更具优势,因此如何从经济效益和生态效应找到最优解,将是今后研究的重点。

4 结论

(1)玉米、大豆间作比单作更有利于资源的利用,并有一定的产量优势。但由于种植模式不同,土壤微生态、产量、经济效益等表现出了明显的差异。

(2)在2:2、2:4间作模式下,间作的产量和效益均高于单作,从经济效益来看,2:2间作优于2:4间作,从土地资源的利用效率来看,2:4间作优于2:2间作。

(3)在玉米和大豆间作体系中,玉米的水分利用

效率显著高于大豆,且间作玉米的水分利用效率显著高于单作玉米。

参考文献:

- [1] 刘天学,王振河,董鹏飞,等. 玉米间作系统的生理生态效应研究进展[J]. 玉米科学, 2007, 15(5): 114-116. LIU T X, WANG Z H, DONG P F, et al. Research progress of physiological and ecological effects in maize intercropping system[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(5): 114-116.
- [2] 曹敏建. 耕作学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2013: 71-74. CAO M J. Farming science[M]. 2nd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2013: 71-74.
- [3] 王自奎,吴普特,赵西宁,等. 作物间套作群体光能截获和利用机理研究进展[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1057-1066. WANG Z K, WU P T, ZHAO X N, et al. A review of light interception and utilization by intercropped canopies[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(6): 1057-1066.
- [4] LITHOURGIDIS A S, DORDAS C A, DAMALASC A, et al. Annual intercrops: An alternative pathway for sustainable agriculture[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5: 396-410.
- [5] 刘洋,孙占祥,白伟,等. 玉米大豆间作对辽西地区作物生长和产量的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(2): 225-228. LIU Y, SUN Z X, BAI W, et al. Effect of maize and soybean interplanting on crops growth and yield in western Liaoning Province[J]. *Soybean Science*, 2011, 30(2): 225-228.
- [6] 苟芳,张立祯,董宛麟,等. 农牧交错带不同间套作模式的土地生产力[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 129-141. GOU F, ZHANG L Z, DONG W L, et al. Productivity of strip intercropping systems in agro-pastoral ecotone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(6): 129-141.
- [7] 程玉柱,李龙,周琴,等. 玉米/大豆不同配置下的玉米生长和产量形成研究[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(1): 34-39. CHENG Y Z, LI L, ZHOU Q, et al. Growth and yield formation of maize under different maize/soybean intercropping patterns[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(1): 34-39.
- [8] 高阳,段爱旺,刘祖贵,等. 单作和间作对玉米和大豆群体辐射利用率及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 7-12. GAO Y, DUAN A W, LIU Z G, et al. Effect of monoculture and intercropping on radiation use efficiency and yield of maize and soybean[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 7-12.
- [9] 曹鹏鹏,田艺心,高凤菊,等. 玉米-大豆间作不同带距和行距对两作物生长及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2018, 50(7): 78-81, 87. CAO P P, TIAN Y X, GAO F J, et al. Effects of different band and row spacing on growth and yield of intercropping maize and soybean[J]. *Journal of Shandong Agricultural Sciences*, 2018, 50(7): 78-81, 87.
- [10] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [11] YU Y, STOMPH T, MAKOWSKI D, et al. A meta-analysis of relative crop yields in cereal/legume mixtures suggests options for management[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 269.

- [12] ZHU Y Y, CHEN H R, FAN J H, et al. Genetic diversity and disease control in rice[J]. *Nature*, 2000, 406(6797):718-722.
- [13] JENSENE S, CARLSSON G, NIELSEN H H. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2020, 40:5.
- [14] DU J B, HAN T F, GAI J Y, et al. Corn-soybean strip intercropping: Achieved a balance between high productivity and sustainability[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16:60345.
- [15] SHARMAN K, RAMAN J S, MANDAL D, et al. Increasing farmer's income and reducing soil erosion using intercropping in rainfed corn-wheat rotation of Himalaya, India[J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2017, 247:43-53.
- [16] AARON L I, LINDA E M, KATHERINEK E, et al. Do polycultures promote win-wins or trade-offs in agricultural ecosystem services? A meta-analysis[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51:1593-1602.
- [17] LI R, ZHANG Z, TANG W, et al. Common vetch cultivars improve yield of oat row intercropping on the Qinghai-Tibetan Plateau by optimizing photosynthetic performance[J]. *Eur J Agron*, 2020, 117:1-13.
- [18] MAO L, ZHANG L, LI W, et al. Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop[J]. *Field Crops Research*, 2012, 138:11-20.
- [19] CHEN P, DU Q, LIU X, et al. Effects of reduced nitrogen inputs on crop yield and nitrogen use efficiency in a long-term maize-soybean relay strip intercropping system[J]. *PLoS ONE*, 2017, 12:1-19.
- [20] 赵建华, 孙建好, 陈亮之, 等. 玉米行距对大豆/玉米间作物生长及种间竞争力的影响[J]. *大豆科学*, 2019, 38(2):229-235. ZHAO J H, SUN J H, CHEN L Z, et al. Growth and interspecific competition of crops as affected by maize row spacing in soybean/maize intercropping system[J]. *Soybean Science*, 2019, 38(2):229-235.
- [21] 张晓娜, 陈平, 庞婷, 等. 玉米/豆科间作种植模式对作物干物质积累、分配及产量的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2017, 35(4):484-490. ZHANG X N, CHEN P, PANG T, et al. The effects of dry matter accumulation, distribution and yield in the maize/soybean and maize/peanut intercropping system[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2017, 35(4):484-490.
- [22] 崔亮, 杨文钰, 黄妮, 等. 玉米-大豆带状套作下玉米株型对大豆干物质积累和产量形成的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8):2414-2420. CUI L, YANG W Y, HUANG N, et al. Effects of maize plant types on dry matter accumulation characteristics and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8):2414-2420.
- [23] 沈荔花, 李娜, 阮妙鸿, 等. 间作隔根对玉米/大豆光合、产量及土壤理化性质的影响[J]. *福建农业学报*, 2020, 35(11):1280-1288. SHEN L H, LI N, RUAN M H, et al. Effects of interactions between roots of intercropped maize and soybean on plant photosynthesis, crop yield, and soil physiochemical properties[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35(11):1280-1288.
- [24] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986. GUAN S Y. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [25] 王子豪, 尹光华, 谷健, 等. 浅埋滴灌水氮钾互作对春玉米水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4):316-324. WANG Z H, YIN G H, GU J, et al. Effects of water, nitrogen and potassium interaction on water use efficiency of spring maize under shallow-buried drip irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4):316-324.
- [26] MEAD R, WILLEY R W. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping[J]. *Experimental Agriculture*, 1980, 16(3):217-228.
- [27] 张兰, 刘济明, 陈敬忠, 等. 不同产地米槁果实营养成分及其与土壤养分和酶活性的相关性研究[J]. *土壤通报*, 2022, 53(4):939-947. ZHANG L, LIU J M, CHEN J Z, et al. Nutritional components of *Cinnamomum migao* fruits from different habitats and their correlations with soil nutrients and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4):939-947.
- [28] 李敏, 刘亚军, 王文静, 等. 不同施肥模式对小麦-甘薯轮作田土壤性质及甘薯生长发育的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(13):250-256. LI M, LIU Y J, WANG W J, et al. Effects of different fertilization patterns on soil properties and sweet potato growth in wheat-sweet potato rotation field[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(13):250-256.
- [29] 陈彦云, 夏皖豫, 赵辉, 等. 粉垄耕作对耕地土壤酶活性、微生物群落结构和功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(12):5009-5021. CHEN Y Y, XIA W Y, ZHAO H, et al. Effects of deep vertical rotary tillage on soil enzyme activity, microbial community structure and functional diversity of cultivated land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(12):5009-5021.
- [30] LI W X, LI L, SUN J H, et al. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an orthic anthrosol in northwest China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 105(3):483-491.
- [31] WANG D W, MARSCHNER P, SOLAIMAN Z, et al. Belowground interactions between intercropped wheat and *Brassicas* in acidic and alkaline soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(4):961-971.
- [32] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 等. 辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(19):3702-3713. GAO Y L, SUN Z X, BAI W, et al. Productivity and water use efficiency of maize-peanut intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19):3702-3713.