

刘 辉,卢 扬,冯月玲,等. 马铃薯套种苦荞对土壤养分、酶活性和微生物的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(10):219-226.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.10.030

# 马铃薯套种苦荞对土壤养分、酶活性和微生物的影响

刘 辉<sup>1</sup>, 卢 扬<sup>1</sup>, 冯月玲<sup>2</sup>, 叶夕苗<sup>1</sup>, 张 叶<sup>3</sup>, 李 飞<sup>1</sup>, 邓仁菊<sup>1</sup>, 张廷刚<sup>4</sup>, 王天顺<sup>5</sup>, 宋 莉<sup>2</sup>

(1. 贵州省农业科学院生物技术研究所, 贵州贵阳 550006; 2. 贵州大学生命科学学院/农业生物工程研究院/  
山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室, 贵州贵阳 550025; 3. 贵州医科大学生物与工程学院, 贵州贵阳 550004;  
4. 贵州省紫云县科技服务中心, 贵州紫云 561399; 5. 贵州省荔波县农业农村局农业技术推广站, 贵州荔波 558499)

**摘要:**为分析马铃薯套种苦荞下不同时期土壤中的养分、土壤酶活性和微生物生态在苦荞不同生长时期的变化。结果表明,与马铃薯净作区相比,马铃薯套种苦荞区的土壤 pH 值在苦荞各个生长时期整体均显著上升。在马铃薯净作区,与 2020 年相比,2021 年不同生长时期各土壤营养指标、土壤酶活性具有显著差异,但是对于马铃薯套作苦荞区,不同生长时期的土壤营养指标和土壤酶活性无显著差异,表明套作苦荞可显著缓解马铃薯连作对土壤的影响。在 2020 年,与净作区相比,马铃薯套作苦荞区在幼苗期的土壤全碳、速效磷含量显著下降,有机质含量显著上升。在苦荞开花期,土壤全碳、全氮、全磷、碱解氮磷含量显著降低,全钾和有机质含量则显著上升;在苦荞成熟期,土壤全碳、全氮、全磷、碱解氮含量显著下降,全钾、速效钾、速效磷含量则无显著变化,有机质含量显著上升;在苦荞幼苗期、开花期与成熟期,土壤脱氢酶活性均显著上升,其他土壤酶活性的变化均不显著;2021 年各指标的变化趋势与 2020 年一致。由结果可知,幼苗期的苦荞需要从土壤中吸收部分碳肥、磷肥,开花期的苦荞需要从土壤中吸收部分碳肥、氮肥、磷肥,成熟期的苦荞需要从土壤中吸收部分碳肥、氮肥。但在上述 3 个时期,土壤脱氢酶活性的提升可以促进有机质代谢,从而提升有机质含量。另一方面,马铃薯套作苦荞可以降低真菌总数、提升细菌总数,尤其是部分具有生防作用的放线菌总数。综上,苦荞套作模式可稳定土壤 pH 值,促进苦荞合理利用土壤中的营养成分,并提升有机质、钾肥含量,同时改善土壤微生物生态系统,降低病害发生率,以缓解马铃薯连作对土壤的影响,因而对马铃薯、苦荞而言均是有益的选择。

**关键词:**马铃薯;套作;苦荞;土壤养分;土壤酶;土壤微生物

**中图分类号:**S532.04;S532.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)10-0219-08

马铃薯是世界第四大粮食作物,也是重要的粮

菜兼用作物和工业原料<sup>[1]</sup>。自 2000 年以来,我国马铃薯种植面积逐年增加,已经成为世界上马铃薯第一大生产国,播种面积和产量均居世界首位<sup>[2]</sup>。大面积单作马铃薯的种植模式改变了传统的轮作制度,使得马铃薯与其他作物轮作倒茬困难。此外,马铃薯重茬、迎茬种植、轮作倒茬年限不够等问题也愈加突出<sup>[2]</sup>。套作利用作物对养分吸收利用的不同生物学特征而形成的不同养分吸收规律,使同一地块上的作物形成时间、空间上的互补性,可从根本上解决作物养分吸收的不平衡,改善群体微生态环境,更有利于农作物的生长发育,从而达到

收稿日期:2022-08-05

基金项目:国家自然科学基金(编号:31860461);国审马铃薯新品种黔芋 7 号示范及推广应用项目(编号:黔科合成果[2020]1Y020);贵州省马铃薯遗传改良科技创新人才团队(编号:黔科合平台人才[2020]5002);贵州薯芋作物病害防控创新能力建设项目(编号:黔科合服企[2021]11 号)。

作者简介:刘 辉(1986—),男,江西宁都人,博士,副研究员,主要从事作物栽培生理学和作物病害绿色防控方面的研究。E-mail:wtl505@126.com。

通信作者:宋 莉,博士,教授,硕士生导师,主要从事植物发育生物学和生物技术方面的研究。E-mail:lpsssl@126.com。

2021,14(3):217-225.

[21]胡 炼,罗锡文,曾 山,等. 基于机器视觉的株间机械除草装置作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报,2013,29(10):12-18.

[22]Meyer G E, Neto J C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2008,63(2):282-293.

[23]Guerrero J M, Guijarro M, Montalvo M, et al. Automatic expert

system based on images for accuracy crop row detection in maize fields[J]. Expert Systems With Applications,2013,40(2):656-664.

[24]刁智华,吴贝贝,毋媛媛,等. 基于最大正方形的玉米作物行骨架提取算法[J]. 农业工程学报,2015,31(23):168-172.

[25]孟庆宽,张 漫,杨耿煌,等. 自然光照下基于粒子群算法的农业机械导航路径识别[J]. 农业机械学报,2016,47(6):11-20.

[26]高永刚,林悦欢,温小乐,等. 基于无人机影像的可见光波段植被信息识别[J]. 农业工程学报,2020,36(3):178-189.

农作物增产增效的目的<sup>[3]</sup>。因此,合理发展套作技术对解决马铃薯连作障碍、提升产量和土地利用率具有重要作用。

贵州省毕节市威宁县地处乌蒙山区,属亚热带季风性湿润气候,无霜期长,雨热同期,是中晚熟马铃薯的主产区。马铃薯生长后期病虫害高发,地上植株非正常死亡后,多生长杂草,降低了土地利用率<sup>[4]</sup>。为了解决这一难题,应该合理应用马铃薯的间作套种技术<sup>[5]</sup>。王海燕等研究发现,马铃薯套种蚕豆虽然会造成单位面积土地上的作物品种增加、密度上升,但其形成的复合生态体系可显著改善蚕豆条带内的透光率,同时提高马铃薯、蚕豆对光能的利用率,从而达到作物增产、增收、增效的目的<sup>[6]</sup>。苦荞含有生物活性物质如黄酮类物质、 $\gamma$ -氨基丁酸、*D*-手性肌醇等,具有较强的抗氧化活性,同时含有超过 60% 的能量物质——淀粉,因而是一种重要的药食两用作物,在西南地区的四川省、云南省、贵州省等地,大面积种植了苦荞,而苦荞在饥荒年代也是一种重要的互补性粮食作物<sup>[7-8]</sup>。目前,在实践和理论方面已有苦荞套作的报道。如龙梦千等发现,苦荞||马铃薯间作能够促进苦荞生长、延缓苦荞衰老、提高光合速率、增加籽粒质量,达到增产的效果<sup>[9]</sup>。毛春等将苦荞套作于马铃薯地块中发现,套作对马铃薯产量无明显影响,还能额外增加苦荞产量和收益<sup>[10]</sup>。汤睿等在春、秋 2 季开展油茶/苦荞、茶树/苦荞、猕猴桃/苦荞 3 种套种模式,其中猕猴桃/苦荞套种模式的经济效益最高<sup>[11]</sup>。马铃薯套作苦荞是贵州省 2 季作区采用的栽培模式,但是目前关于这种栽培模式对土壤理化性质变化的影响鲜见报道。本研究设置马铃薯净作、马铃薯套作 2 种栽培方式,分别于苦荞幼苗期、开花期、成熟期测定农田土壤的养分含量、pH 值和土壤酶活性。本研究拟解决的关键问题在于通过从土肥领域探索马铃薯套作苦荞的深层次机制,旨在为马铃薯套作苦荞的应用推广提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地址在贵州省毕节市威宁县双龙镇江林村,海拔 2 224 m,地理坐标为 104. 28°E、26. 87°N,属于亚热带季风性湿润气候区,具有低纬度的高原季风气候和山地气候特征。年均气温为 10~13℃,年均降水量为 925 mm,无霜期约 250 d。试验地块

无坡度,土壤类型为黄棕壤。

### 1.2 试验设计

田间种植试验于 2020 年 3 月至 2021 年 11 月进行。试验采用单因素随机区组设计,设 2 个处理,分别为马铃薯净作(CK)和马铃薯套作苦荞,每个处理的面积为 672 m<sup>2</sup> (24 m×28 m)。马铃薯播前牛耕 1 次,人工精细整地。马铃薯品种为黔薯 7 号,苦荞品种为黔苦 7 号(均由贵州省生物技术研究所提供)。2 个处理马铃薯的播种时间相同,于 2020 年 3 月种植,播种量为 2 250 kg/hm<sup>2</sup>,按常规种植,行距 7.0 cm,株距 3.0 cm。马铃薯施用 375 kg/hm<sup>2</sup> 磷肥、225 kg/hm<sup>2</sup> 复合肥、22.5 t/hm<sup>2</sup> 农家肥,混合拌匀后用作基肥。现蕾期结合第 1 次中耕培土追施 225 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥;苦荞的播种期根据马铃薯的田间长势确定,原则上在马铃薯成熟期前,基部叶片变黄时,在用耙子除去行间杂草的同时松土,再将苦荞种子均匀撒播在空隙地,等苦荞收获后再收马铃薯。苦荞于 2020 年 7 月中旬种植,播种量为 67.5 kg/hm<sup>2</sup>,采用人工撒播方式播种。2021 年重复上述试验 1 次,马铃薯和苦荞的种植、收获时间与 2020 年一致。

### 1.3 土壤样品的采集

分别于苦荞幼苗期、开花期、成熟期,在每个处理内按“Z”字形选取采样点,取 5~30 cm 土层土壤作为样品。每个处理取 5 个点的样品均匀混合后作为 1 个土样,剔除样品中的断根、石块等杂质,自然风干后过 1 mm 土筛。土壤样品分为 2 份,1 份用于土壤速效养分含量、pH 值及酶活性的测定,另 1 份保存于 4℃ 冰箱中备用。设 T1 处理为幼苗期马铃薯净作的土样,T2 处理为幼苗期马铃薯套作苦荞的土样,T3 处理为开花期马铃薯净作的土样,T4 处理为开花期马铃薯套作苦荞的土样,T5 处理为成熟期马铃薯净作的土样,T6 处理为成熟期马铃薯套作苦荞的土样。

### 1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤 pH 值和养分的测定 土壤 pH 值的测定参照王玉琴等的方法<sup>[12]</sup>,以无 CO<sub>2</sub> 的超纯水作为浸提液,按土液比 1 g:1.5 mL 均匀搅拌 1 min,于 4 000 r/min 离心 2 min 后取上清液,用 pH 计测定酸碱度。

土壤养分指标包括土壤干湿比、全碳含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、速效磷含量、速效钾含量、碱解氮含量、有机质含量。全碳含量的测定

参照 HJ 695—2014《土壤 有机碳的测定 燃烧氧化-非分散红外法》,全氮含量的测定参照 LY/T 1228—2015《森林土壤氮的测定》,全磷含量的测定参照 GB/T 9837—1988《土壤全磷测定法》,全钾含量的测定参照 NY/T 87—1988《土壤全钾测定法》,碱解氮含量的测定参照 LY/T 1229—1999《森林土壤水解性氮的测定》,速效磷含量的测定参照 NY/T 1121.7—2014《土壤检测 第 7 部分:土壤有效磷的测定》,速效钾含量的测定参照 NY/T 889—2004《土壤速效钾和缓效钾含量的测定》,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法进行测定。

1.4.2 土壤酶活性的测定 土壤酶包括土壤脲酶(soil surease, Ure)、土壤蔗糖酶(soil saccharase, Sac)、土壤酸性磷酸酶(soil acid phosphatase, ACP)、土壤硝酸还原酶(soil nitrate reductase, NR)、土壤脱氢酶(soil dehydrogenase, DHA)活性,分别采用苯酚钠-次氯酸钠比色法、3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS)比色法、磷酸苯二钠比色法、2,3,5-氯化三苯基四唑(triphenyl tetrazole chloride, TTC)比色法、S-NR 活体法测定其活性<sup>[13]</sup>。

## 1.5 土壤微生物类群的测定

用平板稀释法对细菌、真菌和放射菌进行计数,具体采用稀释涂布平板法。对土壤溶液设置 3 个稀释梯度( $10^{-3}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-6}$ ),分别吸取 200  $\mu\text{L}$  土壤悬液涂在细菌固体培养基、真菌固体培养基和放线菌固体培养基上,置于 30  $^{\circ}\text{C}$  恒温培养箱中培养 3 d 后计数。具体参照周华兰等的方法<sup>[1]</sup>。

## 1.6 数据处理

用 Origin 2018 进行数据整理和绘图,用 Genstat 19.0 进行显著性分析,用最小显著性差异法(LSD)进行处理间的差异显著性多重比较( $\alpha=0.05$ ),用 DPS 7.0 进行指标间的相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同时期的土壤 pH 值和养分含量

由表 1 可知,在马铃薯净作的土地上,2021 年的土壤 pH 值相较 2020 年均显著下降,在苦荞幼苗期、开花期、成熟期分别降低了 5.51%、3.89%、3.98%。但在套作区,套作苦荞后的土壤 pH 值在同一年相比净作区整体显著升高,2020 年与 2021 年相比无显著差异。

从各种营养元素的变化情况来看,在同一年

表 1 马铃薯套作苦荞土壤的 pH 值和养分含量

土壤样品	年份	pH 值	全碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有机质含量 (g/kg)
T1	2020 年	6.17 ± 0.055e	9.68 ± 0.66e	1.78 ± 0.11ef	1.13 ± 0.14fg	12.11 ± 0.72ab	143.20 ± 30.15d	4.54 ± 0.75e	128.40 ± 3.82cd	18.42 ± 1.38f
	2021 年	5.83 ± 0.026g	7.27 ± 0.04g	1.06 ± 0.09h	1.53 ± 0.16cd	12.45 ± 0.23a	101.56 ± 9.58e	9.66 ± 0.56d	159.88 ± 12.06b	15.08 ± 1.06g
T2	2020 年	6.24 ± 0.037d	8.69 ± 0.05f	1.87 ± 0.08e	1.03 ± 0.07g	12.16 ± 0.22ab	140.00 ± 9.82d	1.57 ± 0.49f	124.40 ± 14.59d	29.54 ± 1.59c
	2021 年	6.19 ± 0.051d	8.61 ± 0.09f	1.15 ± 0.25g	1.11 ± 0.13fg	12.29 ± 0.30ab	135.82 ± 10.09d	1.63 ± 0.48f	130.72 ± 9.10cd	30.19 ± 1.19c
T3	2020 年	6.43 ± 0.009b	27.35 ± 0.88a	2.50 ± 0.03a	1.62 ± 0.09b	11.84 ± 0.93b	236.30 ± 6.05a	42.68 ± 11.18bc	129.40 ± 4.98cd	29.41 ± 1.48c
	2021 年	6.18 ± 0.011d	24.39 ± 0.32b	2.21 ± 0.16c	2.09 ± 0.09a	12.28 ± 0.18ab	189.27 ± 11.16bc	76.36 ± 10.83a	158.94 ± 4.66b	23.66 ± 0.98e
T4	2020 年	6.48 ± 0.012a	23.32 ± 1.11bc	2.17 ± 0.06d	1.35 ± 0.00e	12.38 ± 0.14a	187.00 ± 1.48bc	27.18 ± 3.61c	135.10 ± 0.43c	35.10 ± 0.57b
	2021 年	6.46 ± 0.024a	22.77 ± 0.51bc	1.91 ± 0.08de	1.37 ± 0.05de	12.42 ± 0.27a	186.45 ± 2.22bc	29.27 ± 5.59c	141.05 ± 6.84bc	33.45 ± 1.78b
T5	2020 年	6.28 ± 0.014d	24.05 ± 0.03bc	2.35 ± 0.01b	1.48 ± 0.00d	11.89 ± 0.15b	197.80 ± 14.29b	32.59 ± 2.51c	136.60 ± 3.03c	33.03 ± 2.05b
	2021 年	6.03 ± 0.021f	21.58 ± 0.23c	2.19 ± 0.11c	1.66 ± 0.14b	12.34 ± 0.09ab	167.53 ± 4.88c	52.42 ± 8.23b	182.44 ± 5.56a	27.18 ± 1.18d
T6	2020 年	6.32 ± 0.018cd	20.69 ± 1.71d	1.99 ± 0.03de	1.28 ± 0.05f	12.12 ± 0.01ab	170.70 ± 3.56c	31.53 ± 3.82c	135.30 ± 3.43c	39.43 ± 2.36a
	2021 年	6.35 ± 0.019c	19.46 ± 0.082d	1.82 ± 0.06e	1.30 ± 0.06ef	12.25 ± 0.11ab	166.72 ± 6.43c	32.67 ± 7.92c	137.94 ± 8.89bc	37.88 ± 2.48a

注:同列数据后标有不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

份,苦荞幼苗期、开花期和成熟期的土壤全碳、全氮、全磷、全钾和碱解氮、速效磷含量整体均呈现先升高后降低的趋势,排序为开花期>成熟期>幼苗期;速效钾含量均呈现持续增加的趋势。在 2020 年,马铃薯套作苦荞与马铃薯净作相比,全碳含量在幼苗期、开花期、成熟期分别降低了 10.23%、14.73%、13.97%,且差异均达到显著水平;全氮含量在幼苗期无显著差异,而在开花期、成熟期则分别显著下降了 13.20%、15.32%;碱解氮含量在幼苗期无显著变化,开花期、成熟期则分别显著下降了 20.86%、13.70%;全磷含量在幼苗期无显著差异,但呈下降趋势,在开花期、成熟期则分别显著下降了 16.67%、13.51%;速效磷含量在幼苗期显著降低了 65.42%,而在开花期、成熟期无显著差异;全钾、速效钾含量在幼苗期、开花期和成熟期均无显著差异;有机质含量在幼苗期、开花期、成熟期分别显著上升了 60.37%、19.35%、19.38%。2021 年的变化趋势与 2020 年的一致,但在净作区,2021 年的土壤全碳、全氮、碱解氮含量相对 2020 年显著降低,而全磷、速效磷、速效钾含量显著上升,全钾含量差异不显著。在套作区套作苦荞后,除全氮含量幼苗期在 2021 年显著低于 2020 年外,所有土壤的营养指标 2021 年与 2020 年相比无显著差异。

土壤养分与酶活性之间的相关性分析结果表明,在连坐土壤中,蔗糖酶活性与全碳、速效钾含量极显著正相关,而与速效磷极显著负相关;磷酸酶活性与 pH 值、速效磷、速效钾含量极显著正相关;脲酶活性与速效磷含量极显著负相关,而与速效钾含量显著正相关;硝酸还原酶活性与碱解氮含量、有机质含量、细菌数量显著或极显著正相关,而与速效磷和真菌数量显著或极显著负相关;脱氢酶活性与碱解氮、速效钾、有机质、细菌数量显著或极显著正相关,而与速效磷含量、真菌数量显著或极显著负相关(表 2)。

在套作土壤中,蔗糖酶活性与全碳含量、碱解氮含量、速效钾含量、有机质含量、细菌数量、放线菌数量显著或极显著正相关,而与真菌数量极显著负相关;磷酸酶活性与速效磷、有机质含量显著或极显著正相关;脲酶活性与碱解氮含量、有机质含量、放线菌数量显著或极显著正相关;硝酸还原酶活性与 pH 值、碱解氮含量、有机质含量、细菌数量、放线菌数量显著或极显著正相关;脱氢酶活性与 pH 值、碱解氮含量、速效钾含量、有机质含量、细菌数量、放线菌数量显著或极显著正相关,而与真菌数量极显著负相关(表 2)。

表 2 土壤酶活性与土壤养分和土壤微生物之间的相关性分析

种植方式	指标	相关系数								
		pH 值	全碳含量	碱解氮含量	速效磷含量	速效钾含量	有机质含量	细菌数量	真菌数量	放线菌数量
连作	蔗糖酶活性	-0.153	0.835 **	0.452	-0.778 **	0.776 **	0.135	0.568	-0.486	0.416
	磷酸酶活性	0.703 **	0.123	0.245	0.879 **	0.727 **	0.557	-0.389	0.375	-0.469
	脲酶活性	0.264	0.184	0.126	-0.902 **	0.626 *	0.475	0.336	0.137	0.281
	硝酸还原酶活性	0.276	0.306	0.777 **	-0.626 *	0.533	0.778 **	0.667 *	-0.833 **	0.556
	脱氢酶活性	0.558	0.291	0.639 *	-0.639 *	0.708 **	0.833 **	0.703 **	-0.776 **	0.438
套作	蔗糖酶活性	-0.412	0.925 **	0.634 *	0.023	0.715 **	0.767 **	0.706 **	-0.753 **	0.835 **
	磷酸酶活性	0.456	0.189	0.321	0.933 **	0.163	0.670 *	0.159	0.291	0.151
	脲酶活性	0.573	0.214	0.738 **	0.118	0.443	0.745 **	0.425	0.185	0.739 **
	硝酸还原酶活性	0.655 *	0.021	0.862 **	0.124	0.377	0.642 *	0.802 **	0.133	0.683 *
	脱氢酶活性	0.781 **	0.173	0.639 *	0.075	0.667 *	0.924 **	0.767 **	-0.876 **	0.933 **

注: \*、\*\* 分别表示在 0.05、0.01 水平显著相关。

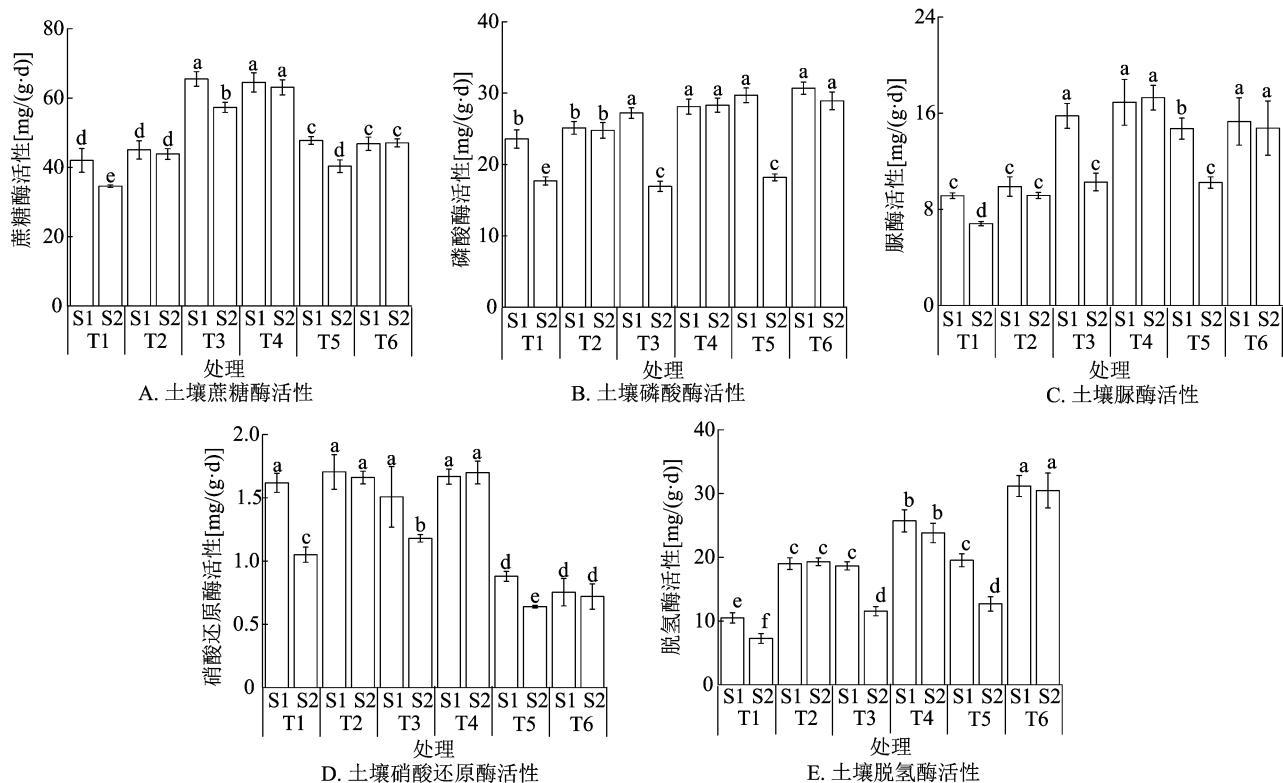
2.2 不同时期土壤中的酶活性

由图 1 可知,在 2020 年,马铃薯净作区和苦荞套作区的幼苗期、开花期、成熟期马铃薯土壤蔗糖酶活性无显著差异,2021 年每个生长时期的蔗糖酶活性相对净作区显著上升,但在各个生长时期,2021

年马铃薯净作区的土壤蔗糖酶活性要显著低于 2020 年。套作苦荞后,土壤蔗糖酶活性相对净作显著升高,恢复至连作之前的水平,重复套作的第 2 年(2021 年)的酶活性与套作区的 2020 年数据差异不显著(图 1-A)。除此以外,土壤磷酸酶、脲酶、硝

酸还原酶活性的变化趋势与土壤蔗糖酶活性一致(图 1-B、图 1-C、图 1-D)。而对于土壤脱氢酶活性而言,在 2020 年的马铃薯幼苗期,马铃薯套作苦荞的土壤脱氢酶活性比马铃薯净作处理显著提高了 81.22%,在开花期、成熟期则分别显著提高了 37.83%、59.70%。在 2021 年的马铃薯幼苗期、开

花期和成熟期,马铃薯套作苦荞处理的土壤脱氢酶活性比马铃薯净作处理分别显著提升 165.84%、106.33%、140.19%;在各个生长时期,2021 年马铃薯净作区的土壤脱氢酶活性显著低于 2020 年,但套作苦荞后,土壤脱氢酶活性显著提高,与 2020 年套作苦荞区各时期相比无显著差异(图 1-E)。



S1、S2 分别代表 2020、2021 年度。条形图上标有不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。图 2 同

图1 马铃薯套作苦荞土壤的酶活性变化

### 2.3 不同时期土壤中的微生物含量

由图 2 可知,与马铃薯净作区域相比,马铃薯套作苦荞区域马铃薯幼苗期、开花期、成熟期的细菌总数、放线菌总数显著上升,其中在 2020 年,细菌总数分别增加了 36.88%、91.85%、188.74%,2021 年则分别增加了 58.68%、173.12%、242.47%;2020 年的放线菌总数分别增加了 26.01%、75.77%、193.49%,2021 年的放线菌总数则分别增加了 79.31%、153.25%、250.34%;真菌总数在 2020 年分别减少了 43.98%、28.20%、50.66%,2021 年则分别减少了 53.78%、51.69%、61.46%;真菌总数/细菌总数在 2020 年分别下降了 58.57%、62.35%、83.01%,在 2021 年则分别下降了 70.07%、82.18%、88.84%。在马铃薯净作区,与 2020 年相比,2021 年马铃薯幼苗期、开花期、成熟期的细菌总

数分别显著减少 18.22%、28.95%、17.70%,放线菌总数则分别减少 32.19%、27.78%、20.56%,真菌总数分别增加了 42.51%、46.33%、34.74%,真菌总数/细菌总数分别显著上升了 72.86%、104.71%、64.05%;在马铃薯套作苦荞区,2021 年和 2020 年的细菌总数和放线菌总数在不同生长时期均无显著差异;幼苗期的真菌总数在 2021 年显著高于 2020 年,开花期和成熟期的真菌总数无显著性差异。

### 3 讨论

有限的土地资源使得马铃薯连年栽培现象普遍发生,但是多年连作使得马铃薯连作障碍现象发生较为严重,导致土壤 pH 值下降、根际土壤微生物群落失衡,尤其是镰刀菌、枯萎病病原菌、黑痣病病原菌等致病菌增加,同时土壤蔗糖酶、脲酶等代谢酶

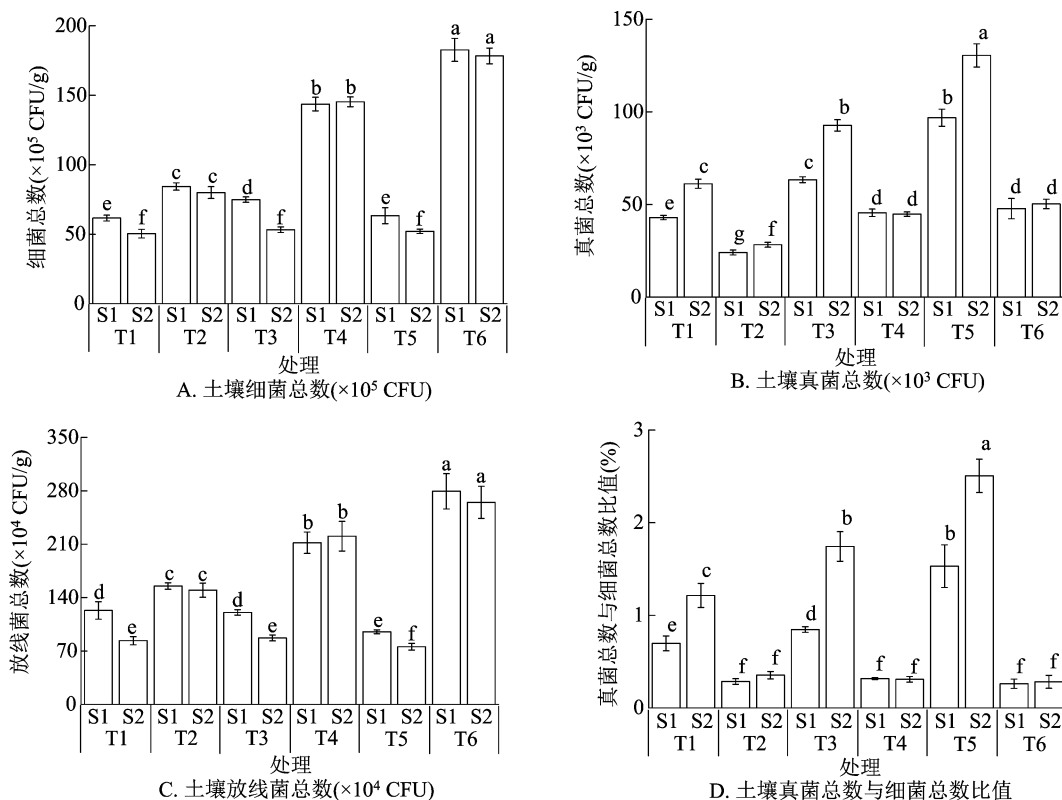


图2 马铃薯套作苦荞的土壤微生物数量及比例

活性下降,最终导致病虫害发生频繁,土壤营养失衡,严重影响马铃薯的产量和品质<sup>[1,14-16]</sup>。研究发现,马铃薯套作苦荞,在马铃薯的行间撒播苦荞,利用马铃薯枯死的残留叶片的肥效和土壤肥料残留可以少施无机肥,防止对土壤造成危害,一方面可以持续利用耕田,维护生态环境,避免连作马铃薯造成品种退化和有害物质的大量残留。另一方面,可以保证有足够多的土地播种苦荞,投入少产量高<sup>[10]</sup>。因此,马铃薯套作苦荞是解决马铃薯连作障碍的一个有效方法,本研究重点探讨其中的机制。

本研究中,在马铃薯净作区,2021 年的土壤 pH 值显著低于 2020 年,而马铃薯套作苦荞区,2021 年与 2020 年的土壤 pH 值差异不显著,且在幼苗期、开花期、成熟期,套作苦荞以后的 pH 值显著高于当年的净作区。结果表明,马铃薯连作可导致土壤酸化,这与周华兰等的研究结果<sup>[1]</sup>一致。套作苦荞则可稳定土壤酸碱度,缓解马铃薯连作对土壤 pH 值的影响。

大量研究表明,马铃薯连作会导致土壤酶(蔗糖酶、脲酶、蛋白酶、过氧化氢酶、磷酸酶等)活性降低,最终引起受土壤酶调控的各种营养指标的变化,从而使马铃薯产量和品质降低,连作障碍因此

而形成<sup>[17-18]</sup>。土壤速效养分含量是衡量土壤肥力的重要指标<sup>[19]</sup>。土壤酶是土壤肥力密切相关的量,参与土壤中的物质转化、养分固定及矿化过程<sup>[20]</sup>。蔗糖酶是土壤碳营养分解和转化的重要土壤酶,其活性高低可指示土壤的生化活性<sup>[12]</sup>。土壤磷酸酶参与了土壤中有有机磷转化为无机磷过程,是其中的关键酶<sup>[13]</sup>。脲酶可促使土壤中尿素转化为氮素,供作物生长所需<sup>[21]</sup>。土壤硝酸还原酶是一种将土壤中硝酸盐还原为亚硝酸盐的氧化还原酶,是土壤硝态氮还原的关键酶,可作为作物生育期氮素代谢的生理指标<sup>[22]</sup>。脱氢酶是存在于活体微生物中可催化底物去除氢原子的一种土壤酶,是有机质分解过程中所需的第一酶,可以反映土壤体系中微生物的数量及其对有机物的降解能力<sup>[23]</sup>。作物之间的套作对土壤酶活性和土壤营养成分具有改善作用,如秦伟等研究发现,设施番茄在套种大蒜以后,土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶等的活性显著增强,同时碱解氮和速效磷含量因此而得到显著提升<sup>[16]</sup>。但不同套作模式对土壤酶活性的作用结果不尽相同,例如小麦套作大豆可显著增强土壤磷酸酶活性,而玉米间作鹰嘴豆则可显著降低土壤脲酶和磷酸酶活性<sup>[24]</sup>。

本研究表明,2021 年与 2020 年相比,马铃薯净作区的土壤全碳、全氮、碱解氮、有机质含量在各个生长时期整体均显著降低,全磷、速效磷、速效钾含量则显著上升,全钾含量无显著变化;马铃薯套作苦荞以后,不同生长时期的土壤营养指标均无显著性差异,表明套作苦荞可显著缓解马铃薯连作障碍。在 2020 年,马铃薯套作苦荞区与净作区相比,幼苗期的土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾含量无显著差异,全碳和速效磷含量显著下降,有机质含量显著上升,同时期的土壤蔗糖酶、磷酸酶、脲酶、硝酸还原酶无显著性差异,脱氢酶活性则显著上升,与相对应的土壤营养指标变化一致。结果表明,幼苗期苦荞需要从土壤中吸收部分碳肥和磷肥,但同时可以提升土壤脱氢酶活性,以促进有机质代谢,从而提升有机质含量;开花期的土壤全碳、全氮、全磷、碱解氮和速效磷含量显著降低,全钾、速效钾和有机质含量则显著上升,与这些指标相对应的土壤蔗糖酶、磷酸酶、脲酶、硝酸还原酶活性无显著性差异,脱氢酶活性则显著上升,表明苦荞在开花期需要从土壤中吸收部分碳肥、氮肥、磷肥,但可有效提升土壤钾肥和有机质含量;在苦荞成熟期,土壤全碳、全氮、全磷、碱解氮含量显著下降,全钾、速效钾、速效磷含量则无显著变化,有机质含量显著上升,相对应的土壤蔗糖酶、磷酸酶、硝酸还原酶无显著性差异,脱氢酶活性则显著上升,表明在成熟期,苦荞需要从土壤中吸收部分碳肥、氮肥和磷肥,对钾肥需求不明显,但可显著提升土壤有机质含量;2021 年的数据变化与 2020 年一致。结果表明随着苦荞的生长,对土壤中的磷肥、氮素、碳素的需求增加,其中幼苗期需要碳肥和磷肥,开花期需要更多的碳肥、氮肥、磷肥,成熟期需要更多的碳素和氮素,这与苦荞不同生长时期对营养的需求一致<sup>[25]</sup>。马铃薯套作苦荞可提升土壤有机质和钾肥含量,对马铃薯连作土壤有一定的改善作用。

研究发现,合理间、套作能改善连作导致的土壤微生物群落结构改变,并增加土壤微生物功能多样性,可在一定程度上稳定土壤微生态环境<sup>[26-29]</sup>。如研究发现玉米间作花生可显著提升土壤细菌和真菌的生物量,花生根系分泌物有助于根际土壤中革兰氏阳性菌和丛枝菌根的累积<sup>[30]</sup>。马铃薯、玉米间作增强了土壤中以羧酸类、氨基酸类、多聚类、芳香类化合物为碳源的土壤微生物代谢活动,对土壤微生态环境和土壤微生物功能多样性具有较大的

改进作用<sup>[31]</sup>。本研究中,马铃薯套作苦荞,可显著提升开花期和成熟期的细菌总数,尤其是放线菌总数显著提升,而真菌总数则显著下降,提升了细菌总数/真菌总数比值。由于马铃薯连作可导致土壤中一些真菌性病害如枯萎病、黑痣病、晚疫病、早疫病等病原菌增加的概率大增,而一些具有促生和抗病作用的生防细菌尤其是放线菌数量下降<sup>[1]</sup>。马铃薯套作苦荞对土壤细菌和真菌数量的影响结果表明该栽培模式可有效缓解马铃薯连作土壤微生物由细菌型向真菌型转化,这与马铃薯间作蚕豆、荞麦的研究结果<sup>[32]</sup>一致。

前人研究表明,土壤微生物数量、土壤营养成分含量及土壤酶活性紧密相关,如土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性与土壤微生物数量、有机质和速效氮含量显著正相关,但与 pH 值则显著负相关<sup>[33]</sup>。大棚内茄子套种大蒜,大蒜可通过根系分泌纤维素、糖类等养分,加强根际有益微生物的代谢活动,间接提高土壤脲酶和磷酸酶活性,从而促进土壤氮素的转化和有机磷的矿化,最终为茄子丰产和连作障碍的改善奠定基础<sup>[16]</sup>。本研究结果表明,连作土壤中蔗糖酶活性与全碳、速效钾含量极显著正相关,与速效磷含量极显著负相关。磷酸酶活性与 pH 值、速效磷和速效钾含量极显著正相关。脲酶活性与速效钾含量显著正相关,而与速效磷含量极显著负相关。硝酸还原酶活性与碱解氮、有机质含量和细菌总数显著或极显著正相关,而与速效磷含量和真菌总数显著或极显著负相关。脱氢酶活性与碱解氮、速效钾、有机质含量和细菌总数显著或极显著正相关,而与速效磷含量和真菌总数显著或极显著负相关(表 2)。由于马铃薯连作障碍的产生,导致土壤中氮营养、碳营养、有机质含量显著降低,而速效磷含量则显著增加,引起 pH 值下降,同时真菌数量的上升,造成马铃薯感染病害的可能性增加。因此,速效磷是马铃薯连作障碍形成的主要因子,这与芋艿连作障碍的成因<sup>[34]</sup>类似。

在套作苦荞的土壤中,有机质含量与所有酶活性显著或极显著正相关,真菌数量与蔗糖酶和脱氢酶活性极显著负相关,细菌数量与蔗糖酶、硝酸还原酶和脱氢酶活性极显著正相关,放线菌数量则与除磷酸酶之外的所有酶活性显著或极显著正相关(表 2)。结合套作苦荞以后,相对 2020 年,马铃薯土壤酶活性增强,有机质和速效钾含量增加,细菌和放线菌数量上升,表明有机质对各种土壤酶发挥其活

性具有促进作用,并能增强作物根际土壤微生物活动,是马铃薯套作苦荞缓解连作障碍的关键因素。

综上,马铃薯套作苦荞,可通过改善土壤 pH 值,促进苦荞对磷肥、有机质、氮素、碳素的合理利用,提高土壤有机质和钾肥含量,提升细菌总数/真菌总数比值,改善土壤微生态环境,降低病原菌数量,提升生防菌数量,从而使马铃薯与苦荞套作形成科学合理的种间效应,以缓解马铃薯连作障碍。研究结果可为马铃薯套作苦荞栽培模式的推广提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] 周华兰,彭亚丽,李 婷,等. 马铃薯连作对土壤理化性质和生物学特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(6):611–616.
- [2] 胡新喜,冯艳青,雷 艳,等. 不同施氮水平下秋马铃薯的生长以及 *StNR* 和 *StAT* 的表达[J]. 中国农业科学院,2015,42(10):1974–1982.
- [3] 何稚祺,王鑫鑫,张 弛,等. 间作、套种模式在中药材栽培中的效应研究进展[J]. 江苏农业学报,2021,37(4):1077–1083.
- [4] 江春明,马 琨,代晓华,等. 间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物区系的影响[J]. 生态与农村环境学报,2013,29(6):711–716.
- [5] 魏常慧,刘亚军,冶秀香,等. 马铃薯 || 玉米间作栽培对土壤和作物的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2017,43(1):54–64.
- [6] 王海燕,王晓玲. 马铃薯间作蚕豆的效益评价与栽培研究[J]. 内蒙古农业科技,2007,12(3):37–39.
- [7] 李春花,陈蕤坤,黄金亮,等. 苦荞种质资源遗传多样性分析及抗霜霉病种质筛选[J]. 南方农业学报,2020,51(4):740–747.
- [8] 周美亮. 西藏荞麦的创新利用和发展前景[J]. 西藏农业科技,2018,40(1):7–10.
- [9] 龙梦千,冯 洁,李振东,等. 苦荞 || 马铃薯间作对苦荞生长及产量的影响[J]. 分子植物育种:1–20[2023–01–28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20210913.1929.009.html>.
- [10] 毛 春,蔡 飞,程国尧,等. 马铃薯套作秋播苦荞栽培试验研究[J]. 现代农业科技,2012(8):61,63.
- [11] 汤 睿,李基光,王艳兰,等. 苦荞与幼龄林油茶、茶树、猕猴桃套种的产量及效益分析[J]. 湖南农业科学,2021(10):9–10.
- [12] 王玉琴,尹亚丽,李世雄. 不同退化程度高寒草甸土壤理化性质及酶活性分析[J]. 生态环境学报,2019,28(6):1108–1116.
- [13] Adamczyk B, Kilpeläinen P, Kitunen V, et al. Potential activities of enzymes involved in N, C, P and S cycling in boreal forest soil under different tree species[J]. *Pedobiologia*, 2014, 57(2):97–102.
- [14] 马 玲,马 琨,杨桂丽,等. 马铃薯连作栽培对土壤微生物多样性的影响[J]. 中国生态农业学报,2015,23(5):589–596.
- [15] 李金花,王 蒂,柴兆祥,等. 甘肃省马铃薯镰刀菌干腐病优势病原的分离鉴定[J]. 植物病理学报,2011,41(5):456–463.
- [16] 秦 伟,陈 昆,赵跃锋. 大蒜套作对温室茄子根际土壤微生物数量与土壤酶活性的影响[J]. 山西农业科学,2018,46(11):1831–1833,1902.
- [17] 白艳茹,马建华,樊明寿. 马铃薯连作对土壤酶活性的影响[J]. 作物杂志,2010,136(3):34–36.
- [18] 要 凯,赵章平,康益晨,等. 沟垄覆膜对连作马铃薯土壤酶活性、理化性状及产量的影响[J]. 作物学报,2019,45(8):1286–1292.
- [19] 胡建利,王德建,孙瑞娟,等. 长江下游典型地区农田土壤肥力变化——以常熟市为例[J]. 土壤学报,2008,45(6):1087–1094.
- [20] Wang Y F, Qin Y Z, Chai Q, et al. Interspecies interactions in relation to root distribution across the rooting profile in wheat – maize intercropping under different plant densities[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9:483.
- [21] 卢维宏,张乃明,张 丽,等. 增效肥料对设施栽培小白菜生长及土壤酶活性的影响[J]. 南方农业学报,2019,50(9):2022–2028.
- [22] Cardoso N C, Papadopoulos A O, Kana B D. *Mycobacterium smegmatis* does not display functional redundancy in nitrate reductase enzymes[J]. *PLoS One*, 2021, 16(1):e0245745.
- [23] Tan X P, Wang Z Q, Lu G N, et al. Kinetics of soil dehydrogenase in response to exogenous Cd toxicity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 329(5):299–309.
- [24] 赵庆龙,宋宪亮,孙学振,等. 蒜棉、麦棉套作对土壤微生物数量及相关酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(6):1474–1480.
- [25] 王 佳,陈 伟,张 强,等. 黄土丘陵沟壑区低氮胁迫对苦荞生长及土壤养分的影响[J]. 西南农业学报,2021,34(11):2412–2421.
- [26] 焦念元,汪江涛,张 均,等. 化学调控和施磷对玉米 || 花生间作磷吸收利用和间作优势的影响[J]. 中国生态农业学报,2015,23(9):1093–1101.
- [27] 崔雯雯,宋全昊,高小丽,等. 糜子不同种植方式对土壤酶活性及养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):234–240.
- [28] Jangid K, Williams M A, Franzluebbers A J, et al. Land – use history has a stronger impact on soil microbial community composition than aboveground vegetation and soil properties[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(10):2184–2193.
- [29] 酒鹃鹃,李永梅,王梦雪,等. 玉米大豆间作对坡耕地红壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(22):219–228.
- [30] Li Q S, Wu L K, Chen J, et al. Biochemical and microbial properties of rhizospheres under maize || peanut intercropping[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(1):101–110.
- [31] 马 琨,杨桂丽,马 玲,等. 间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物群落的影响[J]. 生态学报,2016,36(10):2987–2995.
- [32] 刘亚军,马 琨,李 越,等. 马铃薯间作栽培对土壤微生物群落结构与功能的影响[J]. 核农学报,2018,32(6):1186–1194.
- [33] 李旭红,王雪玉,李章波,等. 长期温室栽培对玉米生长生理和土壤酶活性及养分平衡的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(6):60–65.
- [34] 张翰林,郑宪清,王一斐,等. 连作芋艿套作对土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境污染与防治,2014,36(11):55–59,66.