

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.008.

芦美, 赵吉霞, 李永梅, 等. 玉米间作马铃薯对根际土壤酶活性及团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 123-132.

Lu Mei, Zhao Jixia, Li Yongmei, et al. Effects of Intercropping of Maize and Potato on Rhizosphere Soil Enzyme Activity and Aggregate Stability [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 123-132.

# 玉米间作马铃薯对根际土壤酶活性及 团聚体稳定性的影响

芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀

(云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650201)

**摘 要:** [目的] 阐明影响水稳性团聚体稳定性的主要因素, 为云南省红壤坡耕地综合治理提供科技支撑。[方法] 设置玉米单作、马铃薯单作、玉米与马铃薯间作 3 个处理, 分析了间作对作物根际土壤养分含量、酶活性、球囊霉素相关土壤蛋白 (GRSP) 含量、团聚体组成和稳定性的影响, 以及对作物的农艺性状及产量的影响。[结果] (1) 相比于单作, 玉米与马铃薯间作不仅能使马铃薯根际土壤中的有机质、速效磷含量分别显著增加了 13.53%, 46.53% ( $p < 0.05$ ), 而且能使两种作物根际土壤的总球囊霉素相关土壤蛋白 (T-GRSP) 和易提取球囊霉素相关土壤蛋白 (EE-GRSP) 含量均有增加趋势, 其中玉米的差异性达显著水平 ( $p < 0.05$ )。 (2) 相比于单作, 玉米与马铃薯间作可以显著增加两种作物根际土壤的脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性, 以及  $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量 ( $R_{0.25}$ ) 和平均质量直径 (MWD) 值 ( $p < 0.05$ ), 玉米的增幅为 17.63%~41.29%, 马铃薯的增幅为 10.81%~34.79%。 (3) 相比于单作, 玉米与马铃薯间作均可显著增加两种作物的地上部和根系的干重 ( $p < 0.05$ )。玉米与马铃薯间作时土地当量比为  $1.81 > 1$ , 具有间作产量优势。 (4) 相关性分析得出, EE-GRSP、T-GRSP、脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶均与  $R_{0.25}$ , MWD 呈显著正相关关系 ( $p < 0.05$ )。冗余分析得出, 各指标对团聚体指标的影响由大到小分别为过氧化氢酶  $>$  脲酶  $>$  EE-GRSP  $>$  酸性磷酸酶  $>$  T-GRSP, 其中, 过氧化氢酶是影响土壤团聚体组成和稳定的主要影响因子。[结论] 玉米与马铃薯间作不仅能促进两种作物根际土壤的物质循环、增加团聚体的大粒级含量和稳定性, 还能促进两种作物地上部和根系生长, 这对于云南省红壤坡耕地合理间作作物的选择具有重要意义。

**关键词:** 间作; 酶活性; 球囊霉素相关土壤蛋白; 团聚体稳定性; 农艺性状

**中图分类号:** S152.4; S157.4<sup>+</sup>3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)06-0123-10

## Effects of Intercropping of Maize and Potato on Rhizosphere Soil Enzyme Activity and Aggregate Stability

Lu Mei, Zhao Jixia, Li Yongmei, Wang Zilin, Fan Maopan

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to clarify the main factors affecting the stability of water-stable aggregates, and provide the scientific and technological support for the comprehensive management of red soil slope farmland in Yunnan Province. [Methods] Three treatments of maize monoculture, potato monoculture and maize and potato intercropping were set up to analyze the effects of intercropping on crop rhizosphere soil nutrient content, enzyme activity, glomalin-related soil protein (GRSP) content, aggregate composition and stability, as well as the agronomic traits and yield of crops. [Results] (1) Compared with monoculture, intercropping of maize and potato not only significantly increased the content of organic matter and available phosphorus in the rhizosphere soil of potato by 13.53% and 46.53% ( $p < 0.05$ ), respectively,

收稿日期: 2022-09-12

修回日期: 2022-09-28

资助项目: 国家自然科学基金(41661063); 云南省科技重大专项子课题(2019ZG00902-08)

第一作者: 芦美(1996—), 女, 贵州安顺人, 在读硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: aslumei@163.com

通信作者: 范茂攀(1977—), 男, 云南曲靖人, 博士, 教授, 主要从事土壤与水土保持研究。E-mail: mpfan@126.com

<http://stbcjy.paperonce.org>

but also increased the contents of total glomalin-related soil protein (T-GRSP) and easily extractable glomalin-related soil protein (EE-GRSP) in rhizosphere soil of two crops, and the difference of maize reached a significant level ( $p < 0.05$ ). (2) Compared with monoculture, maize and potato intercropping could significantly increase the activities of urease, acid phosphatase and catalase in the rhizosphere soil of the two crops, as well as the content of  $>0.25$  mm water-stable aggregates ( $R_{0.25}$ ) and mean mass diameter (MWD) of soil. The increase rates were 17.63%~41.29% for maize and 10.81%~34.79% for potato. (3) Compared with monoculture, intercropping of maize and potato significantly increased the shoot and root dry weights of both crops ( $p < 0.05$ ). The land equivalent ratio of maize and potato was  $1.81 > 1$ , which had the advantage of intercropping yield. (4) Correlation analysis showed that EE-GRSP, T-GRSP, urease, acid phosphatase and catalase were significantly positively correlated with  $R_{0.25}$  and MWD ( $p < 0.05$ ). Redundancy analysis showed that the effects of each index on aggregate indexes followed the order: catalase  $>$  urease  $>$  EE-GRSP  $>$  acid phosphatase  $>$  T-GRSP, among which catalase was the main factor affecting the composition and stability of soil aggregates. [Conclusion] Intercropping of maize and potato can not only promote the material circulation of rhizosphere soil of two crops, increase the large-size content and stability of aggregates, but also promote the growth of aboveground and root of two crops, which is of great significance for the selection of reasonable intercropping crops in red soil sloping farmland in Yunnan Province.

**Keywords:** intercropping; enzymatic activity; glomalin-related soil protein; soil aggregate stability; agronomic character

土壤侵蚀是指土壤颗粒在受到水力、风力等外力作用时发生破坏、剥蚀和搬运等复杂动态过程,受多种因素的影响<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀的发生致使土壤质量和生产力下降,区域经济和农业可持续发展受到严重影响和限制,现已成为全球性的生态问题<sup>[2]</sup>。红壤是我国重要的土壤资源,广泛分布于江西、广东、云南等南方地区;南方红壤地区雨热同期,适宜农作物生长,但由于降雨强度大等自然因素及人为因素的干扰,导致该区域成为我国土壤侵蚀程度及范围仅次于黄土高原的地区<sup>[3]</sup>。红壤坡耕地是云南省主要耕地类型之一,其面积占全省耕地总面积的 1/2 以上,且水土流失的主要策源地是坡耕地<sup>[4]</sup>。因此开展对云南省坡耕地红壤抗蚀性的研究工作对该区域农业可持续发展具有重大意义。

土壤团聚体是土壤结构的基本组成单元,其稳定性能很好地反映土壤结构的稳定状况和抗侵蚀能力<sup>[5]</sup>。土壤团聚体的形成和稳定受多种因素的复杂动态影响,其中土壤微生物是土壤团聚体形成最活跃的生物因素,其对养分的需求可通过调控胞外酶的产生来间接地影响土壤团聚体稳定性;胞外酶活性不仅可以指示微生物的群落结构和对养分需求的变化,其大小还可以表征土壤肥力状况<sup>[6]</sup>。马寰菲等<sup>[6]</sup>研究土壤团聚体稳定性与土壤酶活性的关系,得出  $\beta$ -N-乙酰氨基葡萄糖酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶分别是 0.25~2 mm,  $<0.25$  mm 粒级团聚体稳定性的主要影响因子。球

囊霉素相关土壤蛋白 (GRSP) 主要是由丛枝菌根真菌菌丝释放到土壤中的一类稳定性极强的疏水性蛋白,进入土壤后不仅能够增加土壤有机碳、氮含量,还能与沙土、黏土颗粒以及有机物质结合形成团聚体结构,对于团聚体稳定性的贡献有“超级胶水”之称,根据提取难易程度可分为总球囊霉素相关土壤蛋白 (T-GRSP) 和易提取球囊霉素相关土壤蛋白 (EE-GRSP)<sup>[7]</sup>。已有研究表明,GRSP 存在于耕地、林地和果园等土地利用中,且对团聚体稳定性有间接影响<sup>[8]</sup>。因此,研究土壤酶和 GRSP 与团聚体之间的关系对于改善水土流失有重要作用。

间作是指分行或分带相间种植两种以上作物的种植方式,是云南省主要种植方式之一<sup>[4]</sup>。前人研究表明,间套作不仅能增加作物农艺性状,还能增加土壤酶活性、GRSP 含量和减轻坡耕地水土流失<sup>[4,9-11]</sup>。由于土壤酶活性、AMF 分泌 GRSP 的含量受作物和土壤类型的影响<sup>[12]</sup>,因此在云南省坡耕地红壤条件下土壤酶、GRSP 对团聚体的影响是否与其他区域的研究结果一致有待确认。又因根际土壤是植物、土壤和微生物进行物质交换等相互作用最活跃的場所,对其的研究能更直接地反映出 AMF 对环境因素变化的响应<sup>[13]</sup>。因此本研究针对云南省红壤坡耕地,设置玉米单作、马铃薯单作、玉米与马铃薯间作 3 种处理,分析不同种植模式下作物根际土壤的养分含量、酶活性、GRSP 含量、团聚体组成和稳定性,以

及作物农艺性状和产量的变化,以及分析土壤指标之间的相互关系,为云南省红壤坡耕地种植模式的选择提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况及作物品种

田间种植试验于2021年4—10月在云南省昆明市盘龙区松华坝水源保护区大摆社区进行(102°78′5″E, 25°27′8″N)。试验地坡度为8°,海拔为2 210 m,年平均气温为16℃,年降雨量为900~1 000 mm,属亚热带季风气候。本研究的田间种植年限为试验地连续种植的第4年,且试验地各小区前3年的种植模式与本研究一致。试验地的pH值为4.9,有机质含量为35.3 g/kg,碱解氮含量为102.1 mg/kg,速效磷含量为19.0 mg/kg,速效钾含量为215.8 mg/kg。种植玉米品种为“云瑞88”,马铃薯品种为“青薯9号”<sup>[14]</sup>。

### 1.2 试验设计

本试验采用随机区组设计,设置玉米单作(MM)、马铃薯单作(MP)、玉米与马铃薯间作(IMP)(文中的IM为此处理的玉米,IP为此处理马铃薯)3个处理,每个处理3个重复,共9个小区,各小区的面积为40 m<sup>2</sup>(4 m×10 m)<sup>[14]</sup>。

玉米单作采用宽窄行种植(宽行行距为80 cm,窄行行距为40 cm),株距均为25 cm;马铃薯单作采用等行距种植,行距为60 cm,株距为30 cm;玉米与马铃薯间作采用2:2的种植模式(种内作物间的行距为40 cm,种间作物间的行距为50 cm),玉米株距为30 cm,马铃薯株距为35 cm。播种时采用穴施,玉米间苗时每穴留一株幼苗。试验期间视田间情况进行浇水和除草作业<sup>[14]</sup>。

施肥方式采用穴施模式,且施肥量按当地施肥量施用。单作和间作玉米施肥量均为N(尿素,含N 46%):315 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(过磷酸钙,含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%):120 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O(硫酸钾,含K<sub>2</sub>O 51%):120 kg/hm<sup>2</sup>,其中氮肥分两次施入(50%做基肥,50%在大喇叭口期进行追肥),磷肥和钾肥全部作基肥施用;单作和间作马铃薯施肥量均为N:150 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:150 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O:225 kg/hm<sup>2</sup>,全部作基肥施用<sup>[14]</sup>。

### 1.3 样品采集

在作物成熟期时运用“S”型5点取样法在各小区内随机选取目标作物,对其株高和茎粗进行测定后将作物整株挖出并运用“抖土法”采集作物根际土壤,将各小区5株作物的根际土壤轻轻混匀并装入塑料盒中带回试验室风干(用于土壤养分、GRSP、酶活性和团聚体的测定),挖出的植株带回实验室,并将地上部

和根系分开,用于农艺性状的测定。

### 1.4 样品分析

#### 1.4.1 指标的测定

(1) 土壤速效磷(AP)、碱解氮(AN)、速效钾(AK)含量和pH值的测定按照鲍士旦主编的《土壤农化分析》进行,使用的方法分别为钼锑抗比色法、碱解扩散法、火焰光度法和酸度计法(土:水为1:2.5)<sup>[15]</sup>。土壤有机碳含量测定:将过1 mm筛的风干土用0.1 mol/l的盐酸酸化后放入TOC(multi N/C 3100)仪进行测定。

(2) 易提取球囊霉素相关土壤蛋白(EE-GRSP)和总球囊霉素相关土壤蛋白(T-GRSP)的提取根据Wright等<sup>[16]</sup>的方法稍加修改,测定采用考马斯亮蓝显色法。

(3) 土壤脲酶(Urease)、蔗糖酶(Sucrase)、酸性磷酸酶(Acid phosphatase)和过氧化氢酶(Catalase)活性的测定参照关松荫<sup>[17]</sup>主编的《土壤酶及其研究方法》进行,使用的方法分别为靛酚比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法、磷酸苯二钠比色法和高锰酸钾滴定法。

(4) 土壤团聚体的测定参照Elliott<sup>[18]</sup>提出的方法进行。

(5) 作物农艺性状和产量的测定。用钢卷尺测定作物的株高(地面到茎叶最高处的垂直高度);用游标卡尺测量作物茎粗(玉米的茎粗测量地面自下而上第3茎节中部的粗度,马铃薯的茎粗测量植株地上5~10 cm处的最大直径)。将作物地上部和根系在105℃下杀青30 min,又于80℃下烘至恒重后测定干重<sup>[19]</sup>。

(6) 产量的测定:玉米单作随机收获1行(非边行,玉米16穗),随机选取10穗后计算平均单穗粒数。取80℃烘干24 h后的玉米籽粒计算玉米千粒重。玉米间作则随机收获1行(非边行,玉米13穗),运用与单作同样的方法测定平均单穗粒数和千粒重。马铃薯单作小区随机收获5行(非边行),马铃薯间作小区同样随机收获5行(非边行),称量块茎总鲜重并计算小区总薯重量。

#### 1.4.2 数据处理

(1) 土壤有机质的计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$OM = OC \times 1.724 \quad (1)$$

式中:OM为土壤有机质含量(g/kg);OC为土壤有机碳含量(g/kg)。

(2) 玉米和马铃薯产量计算公式分别为:

$$Y_M = N \times N_s \times N_G \times TSW / 10^6 \quad (2)$$

式中: $Y_M$ 为玉米产量(kg/hm<sup>2</sup>); $N$ 为每1 hm<sup>2</sup>玉米株数(株/hm<sup>2</sup>); $N_s$ 为平均单株穗数(穗/株); $N_G$ 为平均穗粒数(粒/穗);TSW为千粒重(g)。

$$Y_P = TW_P \times (1\% \sim 1.5\%) \times 10^4 / S \quad (3)$$

式中:  $Y_P$  为马铃薯产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $TW_P$  为小区总薯重量 ( $\text{kg}$ );  $S$  为小区种植面积 ( $\text{m}^2$ )。

(3) 土地当量比计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$\text{LER} = I_m / Y_m + I_r / Y_r \quad (4)$$

式中:  $\text{LER}$  为土地当量比;  $I_m$  为玉米间作产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $Y_m$  为玉米单作产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $I_r$  为马铃薯间作产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $Y_r$  为马铃薯单作产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

(4) 平均质量直径的计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (5)$$

式中:  $\text{MWD}$  为平均质量直径;  $\bar{x}_i$  为各粒级水稳性团聚体平均直径 ( $\text{mm}$ );  $w_i$  为各粒级水稳性团聚体质量百分数 (%)。

(5)  $>0.25 \text{ mm}$  水稳性团聚体含量的计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \quad (6)$$

式中:  $R_{0.25}$  为  $>0.25 \text{ mm}$  水稳性团聚体含量 (%);  $M_{r>0.25}$  为粒径  $>0.25 \text{ mm}$  团聚体累计质量 ( $\text{g}$ );  $M_T$  为各粒级水稳性团聚体质量之和 ( $\text{g}$ )。

表1 不同种植模式下作物根际土壤养分含量、GRSP 含量及其比值的变化

Table 1 Changes of nutrient content, GRSP content and its ratio in crop rhizosphere soil under different planting patterns

处理	pH 值	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	碱解氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效钾/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	总球囊霉素/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	易提取球囊霉素/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	EE-GRSP/ T-GRSP
MM	4.98±0.07	46.21±0.92*	69.17±1.36	21.58±0.89	343.67±41.84	1.43±0.02	0.64±0.03	0.45±0.02
IM	4.92±0.08	41.32±1.22	70.00±2.02	19.32±0.58	363.67±39.35	1.86±0.05*	0.83±0.04*	0.45±0.04
MP	5.08±0.07	43.90±1.14	71.50±1.04	26.18±0.93	426.67±38.92	1.34±0.09	0.75±0.02	0.56±0.02
IP	5.16±0.34	49.84±0.57*	71.17±1.17	38.36±1.44*	495.33±38.45	1.76±0.12*	0.85±0.04	0.48±0.01*

注:表中数据为平均值±标准误;同列的“\*”表示同一种作物在不同种植模式下各指标差异显著( $p < 0.05$ );MM 为玉米单作,IM 为玉米间作,MP 为马铃薯单作,IP 为马铃薯间作;表2同。

## 2.2 不同种植模式下作物根际土壤酶活性的变化

玉米间作的脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性相比于玉米单作均显著增加( $t_{\text{脲酶}} = -3.26$ ,  $p_{\text{脲酶}} = 0.031$ ;  $t_{\text{蔗糖酶}} = -3.46$ ,  $p_{\text{蔗糖酶}} = 0.026$ ;  $t_{\text{酸性磷酸酶}} = -4.06$ ,  $p_{\text{酸性磷酸酶}} = 0.015$ ;  $t_{\text{过氧化氢酶}} = -7.95$ ,  $p_{\text{过氧化氢酶}} = 0.001$ ),其值分别为 25.30%, 40.31%, 17.90%, 17.63%;马铃薯间作与马铃薯单作相比,除蔗糖酶活性有降低趋势外( $p > 0.05$ ),脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性均显著增加( $t_{\text{脲酶}} = -4.06$ ,  $p_{\text{脲酶}} = 0.015$ ;  $t_{\text{酸性磷酸酶}} = -2.66$ ,  $p_{\text{酸性磷酸酶}} = 0.050$ ;  $t_{\text{过氧化氢酶}} = -15.43$ ,  $p_{\text{过氧化氢酶}} < 0.001$ ),其值分别为 34.79%, 20.08%, 15.69%(图1)。

## 2.3 不同种植模式下作物根际土壤团聚体组成和稳定性的变化

在不同处理中,0.5~2 mm 粒级团聚体含量所占比例最高,分布范围为 35.33%~45.44%。玉米间作

## 1.5 数据分析

使用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理。采用 SPSS 25 软件的独立样本 T 检验比较法进行统计分析各指标在不同种植模式下的差异显著性( $\alpha = 0.05$ )。运用 Origin 2018 软件进行绘图。各指标之间的冗余分析使用 Canoco 5 软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植模式下作物根际土壤养分含量指标和 GRSP 含量的变化

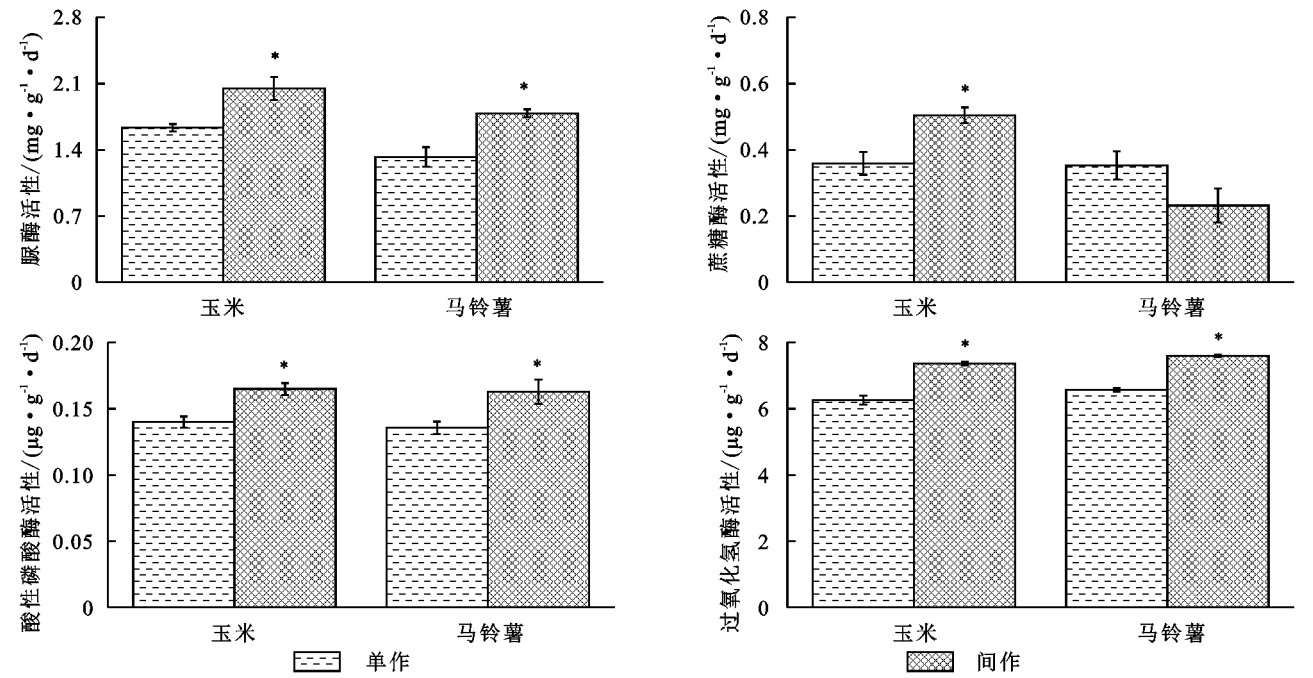
由表1可知,玉米间作与玉米单作相比其根际土壤的 OM 含量显著降低了 10.58% ( $t = 3.20$ ,  $p = 0.033$ ),EE-GRSP 和 T-GRSP 含量分别显著增加了 29.95%, 30.10% ( $t_{\text{EE-GRSP}} = -3.90$ ,  $p_{\text{EE-GRSP}} = 0.018$ ;  $t_{\text{T-GRSP}} = -7.59$ ,  $p_{\text{T-GRSP}} = 0.002$ );马铃薯间作与马铃薯单作相比其根际土壤的 OM, AP 和 T-GRSP 含量分别显著增加了 13.53%, 46.53%, 31.65% ( $t_{\text{OM}} = -4.67$ ,  $p_{\text{OM}} = 0.010$ ;  $t_{\text{AP}} = -7.11$ ,  $p_{\text{AP}} = 0.002$ ;  $t_{\text{T-GRSP}} = -2.91$ ,  $p_{\text{T-GRSP}} = 0.044$ ),EE-GRSP/T-GRSP 显著降低了 14.19% ( $t = 3.06$ ,  $p = 0.038$ )。

与玉米单作相比  $>2 \text{ mm}$  粒级团聚体含量、 $R_{0.25}$  和 MWD 值均显著增加 ( $t_{>2 \text{ mm}} = -3.835$ ,  $p_{>2 \text{ mm}} = 0.019$ ;  $t_{R_{0.25}} = -3.002$ ,  $p_{R_{0.25}} = 0.040$ ;  $t_{\text{MWD}} = -6.49$ ,  $p_{\text{MWD}} = 0.003$ ),其值分别为 91.76%, 24.50%, 41.29%,  $<0.25 \text{ mm}$  粒级团聚体含量显著降低了 62.85% ( $t = 3.002$ ,  $p = 0.040$ );马铃薯间作与马铃薯单作相比 0.5~2 mm 粒级团聚体含量、 $R_{0.25}$  和 MWD 均显著增加 ( $t_{0.5 \sim 2 \text{ mm}} = -3.258$ ,  $p_{0.5 \sim 2 \text{ mm}} = 0.031$ ;  $t_{R_{0.25}} = -3.687$ ,  $p_{R_{0.25}} = 0.021$ ;  $t_{\text{MWD}} = -3.35$ ,  $p_{\text{MWD}} = 0.029$ ),其值分别为 16.47%, 15.04%, 10.81%,  $<0.25 \text{ mm}$  粒级团聚体含量显著降低了 37.91% ( $t = 3.687$ ,  $p = 0.021$ )。说明玉米与马铃薯间作可显著增加两种作物根际土壤水稳性团聚体百分含量和稳定性(表2)。

### 2.4 不同种植模式下作物农艺性状和产量的变化

玉米间作与玉米单作相比地上部干重、根系干重

均显著增加( $t_{\text{地上部干重}} = -3.67, p_{\text{地上部干重}} = 0.021$ ;  $t_{\text{根系干重}} = -4.75, p_{\text{根系干重}} = 0.009$ ),其值分别为 37.89%, 51.02%;马铃薯间作与马铃薯单作相比地上部干重和根系干重均显著增加( $t_{\text{地上部干重}} = 4.95, p_{\text{地上部干重}} = 0.008$ ;  $t_{\text{根系干重}} = 2.82, p_{\text{根系干重}} = 0.048$ ),其值分别为 45.97%, 98.03%;玉米与马铃薯间作时土地当量比为  $1.81 > 1$ ,说明这两种作物间作能促进彼此生长且有增产优势(表 3)。



注:图中的“\*”表示同一种作物在不同种植模式下各指标差异显著( $p < 0.05$ )。

图 1 作物在不同种植模式下其根际土壤酶活性的变化

Fig. 1 Changes of enzyme activity in rhizosphere soil of crops under different planting patterns

表 2 作物在不同种植模式下其根际土壤团聚体组成和稳定性的变化

Table 2 Changes in the composition and stability of rhizosphere soil aggregates under different cropping patterns

处理	团聚体组成/%				$R_{0.25}/\%$	MWD
	$>2\text{ mm}$	$0.5\sim2\text{ mm}$	$0.25\sim0.5\text{ mm}$	$<0.25\text{ mm}$		
MM	$15.29\pm3.50$	$39.10\pm3.75$	$17.55\pm3.63$	$28.05\pm3.92^*$	$71.95\pm3.92$	$0.85\pm0.15$
IM	$29.32\pm1.05^*$	$45.44\pm2.62$	$14.83\pm0.92$	$10.42\pm4.37$	$89.58\pm4.37^*$	$1.20\pm0.05^*$
MP	$21.17\pm0.81$	$35.33\pm0.96$	$15.09\pm0.98$	$28.41\pm2.54^*$	$71.59\pm2.54$	$0.94\pm0.02$
IP	$23.82\pm0.78$	$41.15\pm1.51^*$	$17.39\pm0.97$	$17.64\pm1.45$	$82.36\pm1.45^*$	$1.04\pm0.02^*$

表 3 不同种植模式下作物农艺性状和产量的变化

Table 3 Changes of crop agronomic traits and yield under different planting patterns

鲜干重和农艺性状	处理			
	MM	IM	MP	IP
地上部干重/(g/株)	$139.70\pm3.12$	$192.62\pm14.09^*$	$19.75\pm1.64$	$28.82\pm0.83^*$
根系干重/(g/株)	$8.18\pm0.83$	$12.35\pm0.29^*$	$0.34\pm0.02$	$0.67\pm0.11^*$
根冠比/%	$5.87\pm0.68$	$6.46\pm0.31$	$1.71\pm0.02$	$2.30\pm0.34$
茎粗/cm	$1.92\pm0.13$	$2.02\pm0.16$	$1.10\pm0.07$	$1.16\pm0.06$
株高/cm	$228.67\pm5.21$	$220.33\pm7.37$	$118.44\pm3.78$	$110.33\pm1.17$
产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	$9968.28\pm696.397$	$12414.12\pm666.73$	$24354.87\pm5271.61$	$11719.86\pm825.37$
LER	$1.81\pm0.30$			

注:表中数据为平均值±标准误;表中同行的“\*”表示同一种作物在不同种植模式下各指标差异显著( $p < 0.05$ )。

2.5 土壤养分、酶活性、GRSP 和团聚体指标之间的相互关系

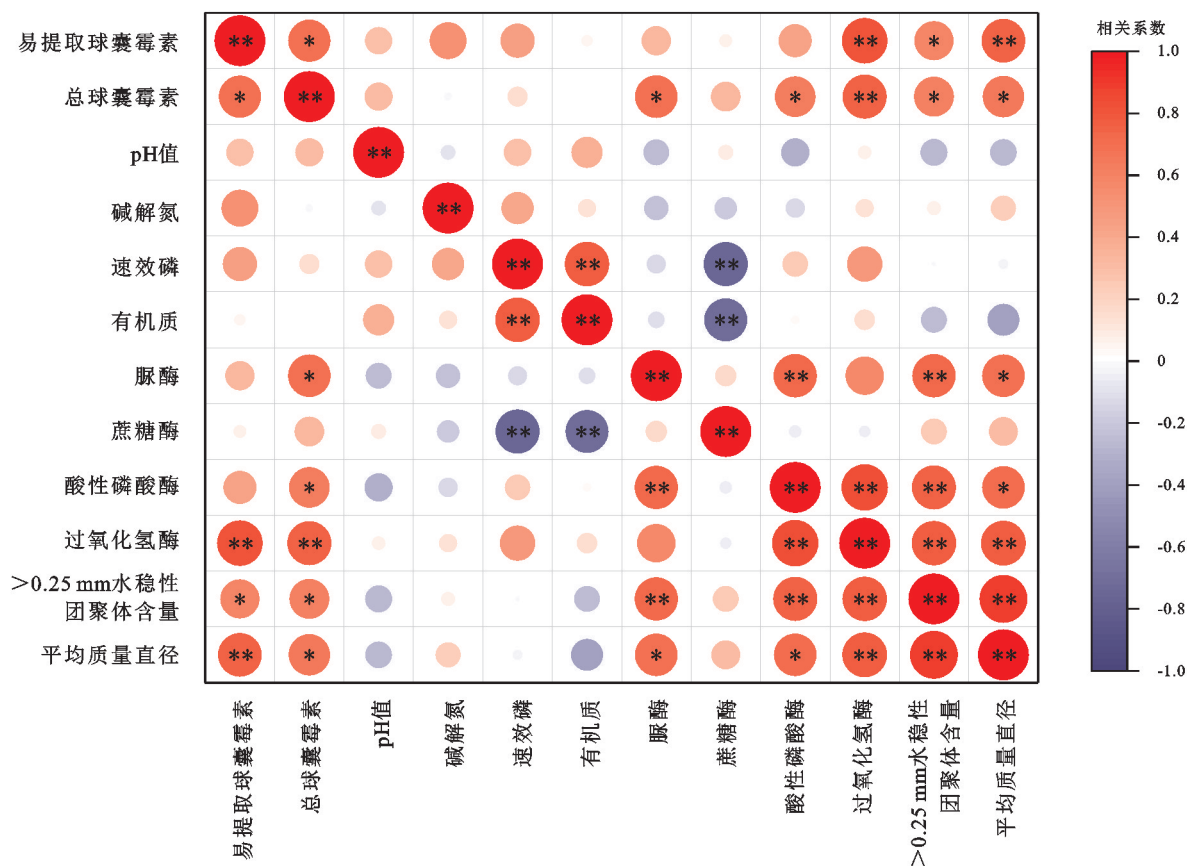
由图 2 可得,pH 值、AN 与各指标间的关系均不显著( $p > 0.05$ ),AP,OM 与蔗糖酶呈显著的负相关

关系( $p < 0.05$ ),EE-GRSP,T-GRSP、脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶与  $R_{0.25}$ ,MWD 间均呈显著正相关关系( $p < 0.05$ )(图 2)。

针对土壤 GRSP、酶与团聚体指标之间的相互关

系,以土壤酶(脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶)和 GRSP (EE-GRSP, T-GRSP) 为解释变量,  $R_{0.25}$  和 MWD 为响应变量,利用冗余分析方法进一步分析影响团聚体指标的主要因子。结果表明,第 1 轴和第 2 轴累计解释量分别为 78.26%, 2.07%, 土壤脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶、EE-GRSP, T-GRSP 分别解释了土壤团聚体指标变异的 10.6% ( $p = 0.096$ ),

3.1% ( $p = 0.394$ ), 59.5% ( $p = 0.004$ ), 4.7% ( $p = 0.254$ ) 和 2.4% ( $p = 0.42$ ), 对土壤团聚体  $R_{0.25}$  和 MWD 的影响由大到小分别为过氧化氢酶>脲酶>EE-GRSP>酸性磷酸酶>T-GRSP, 其中过氧化氢酶对  $R_{0.25}$  和 MWD 的影响达到显著水平 ( $p < 0.05$ ), 说明在本研究的条件下过氧化氢酶是影响土壤团聚体组成和稳定的主要因子(图 3)。



注:图中红色表示正相关,蓝色表示负相关;\*代表  $p \leq 0.05$ ,\*\*代表  $p \leq 0.01$ 。

图 2 土壤养分、酶活性、GRSP 和团聚体指标之间的相关性

Fig. 2 The correlation between soil nutrients, enzyme activity, GRSP and aggregate index

### 3 讨论

#### 3.1 不同种植模式下作物根际土壤养分和 GRSP 含量的变化

种植模式改变土壤养分含量的原因可能与作物根系的分泌物含量、土壤酶活性以及微生物代谢有关<sup>[22]</sup>。本研究中玉米间作与玉米单作相比根际土壤中的 OM 含量显著降低,这可能由于玉米间作时根系分泌物含量增加<sup>[23]</sup>,土壤中难溶性养分在根系分泌物的络合和螯溶作用下转化为有效态,从而使有机质含量降低<sup>[11]</sup>;也可能是玉米与马铃薯间作时 AMF 会促进种间竞争力和菌根依赖性高的玉米吸收更多土壤中的养分,致使间作玉米根际土壤中有机质含量降低<sup>[24]</sup>。本研究结果与瓮巧云等<sup>[25]</sup>研究间作对玉

米根际土壤 OM 含量变化结果一致。马铃薯间作与马铃薯单作相比根际土壤的 OM, AP 含量显著增加,这可能是间作时玉米根系分泌物促进马铃薯根系的生长发育,使马铃薯根系分泌到土壤中的有机物质含量和酸性磷酸酶增加,在酸性磷酸酶的作用下,土壤中难溶态磷转化为无机有效磷的效率增加,从而提高了速效磷含量<sup>[11]</sup>。唐秀梅等<sup>[11]</sup>研究玉米与花生间作时作物根际土壤养分含量的变化,得出花生间作与花生单作相比根际土壤的 AP 含量显著增加,OM 含量有增加趋势,本研究结果与其一致。

与单作相比,玉米与马铃薯间作时两种作物根际土壤的 GRSP 含量均有增加趋势,这可能是由于玉米与马铃薯间作促进了两种作物根系的生长<sup>[26]</sup>,相比于单作可增加 AMF 的侵染几率,使 AMF 的丰度

和活性增强,产生的孢子密度增加,从而能产生更多的 GRSP<sup>[26-27]</sup>。此外,玉米与马铃薯间作时玉米根系分泌总糖含量增加,为 AMF 的生长发育提供了丰富的碳源和能源物质,使 AMF 菌丝释放到土壤中的 GRSP 含量增加<sup>[23,10]</sup>。赵德强等<sup>[10]</sup>研究间作对玉米土壤 GRSP 含量的影响,得出间作条件下 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量均显著高于单作,这与本研究结果一致。伏云珍等<sup>[28]</sup>研究玉米与马铃薯间作时作物根际土壤中 AMF 的变化,得出马铃薯间作相比于马铃薯单作其根际土壤中 AMF 的 OTU 数和  $\alpha$  多样性指数均增加,这也从侧面证实了本研究的结果。本研究还得出马铃薯间作根际土壤中 EE-GRSP 占 T-GRSP 的比例显著低于马铃薯单作,这可能是由于间作条件下土壤的人为扰动较大,使 EE-GRSP 更易消耗或向 T-GRSP 转化<sup>[29]</sup>。

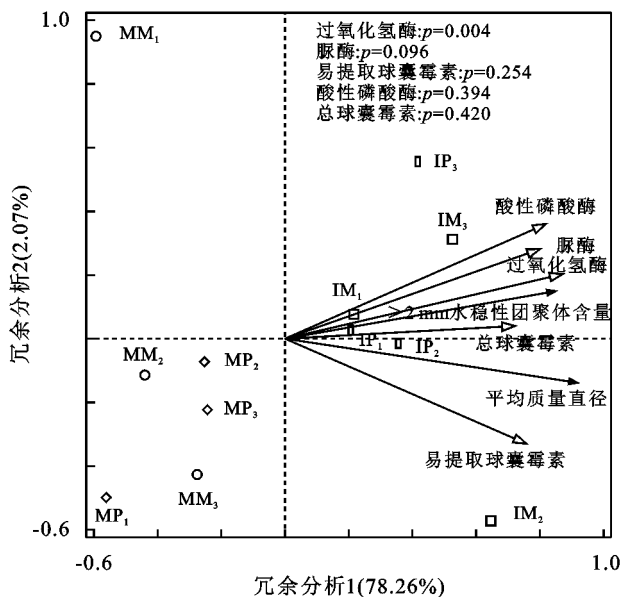


图3 土壤酶活性、GRSP与团聚体指标间的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis between soil enzyme activity, GRSP and aggregate index

### 3.2 不同种植模式下作物根际土壤酶活性的变化

本研究结果表明,除马铃薯间作的根际土壤蔗糖酶活性相比于单作有降低趋势外,玉米、马铃薯间作的脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性相比于相应的单作均显著增加。说明玉米与马铃薯间作可促进两种作物根际土壤中的物质循环和能量转化。这可能是由几个方面导致的,一方面玉米与马铃薯间作时根系发生相互作用,使根际土壤的生境由于有机物转化速度加快和生物氧化代谢活性的加强发生改变,从而促进了根系向土壤中分泌酶的数量,酶活性因而得到提高<sup>[30]</sup>;另一方面,施入土壤中的化学肥料通过改变土壤养分含量和微生物区系来影响土壤酶活性,已有研究表明施入氮肥可增加土壤脲酶、蔗糖

酶和过氧化氢酶的活性<sup>[30]</sup>。唐秀梅等<sup>[11]</sup>研究玉米与花生间作对作物根际土壤酶活性的影响,得出在间作模式下,玉米和花生根际土壤的脲酶和酸性磷酸酶活性均高于单作,本研究结果与其一致;张道勇等<sup>[31]</sup>研究苹果树间作白三叶对苹果树不同土层酶活性的影响,结果表明在0—20 cm土层中过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶活性均有增加趋势,本研究结果与其一致。

### 3.3 不同种植模式下作物根际土壤团聚体组成和稳定性的变化

土壤团聚体的各团粒组成与其稳定性密切相关,是土壤肥力的重要因素; $R_{0.25}$ 和MWD可以衡量土壤团聚体稳定性,当值越大说明土壤团聚体稳定性越好<sup>[21]</sup>。本研究得出,与单作相比,玉米与马铃薯间作可显著增加玉米根际土壤的>2 mm粒级团聚体含量和马铃薯根际土壤0.5~2 mm粒级团聚体含量,同时也能使两种作物根际土壤 $R_{0.25}$ 和MWD显著增加。说明玉米与马铃薯间作可促进作物根际土壤形成大团聚体以及增加团聚体稳定性。这与向蕊等<sup>[32]</sup>研究间作对土壤团聚体组成和稳定性的影响结果一致。产生这一结果的原因可能有以下几方面:(1)玉米是高位作物,马铃薯是矮位作物,它们间作时可以增加地表覆盖度,且马铃薯茎叶的拦截作用可降低从玉米叶片上聚成的雨滴重力势能,从而减小土壤侵蚀<sup>[4]</sup>;(2)根系是作物固土的主要部分,间作时马铃薯和玉米根系形态特征得以促进,形成更大的网络结构,从而增加了土壤团聚体稳定性<sup>[33]</sup>;(3)间作时使作物根系和真菌菌丝产生更多的土壤团聚体形成和稳定的胶结物质,如糖类、有机酸类以及糖蛋白类物质等<sup>[34]</sup>;(4)间作可使马铃薯根际土壤的球囊霉属和类球囊霉属丰度增加,这两种属产生的菌丝分枝结构有利于团聚体的形成和稳定<sup>[28,34]</sup>。

### 3.4 不同种植模式下作物农艺性状和产量的变化

本研究得出,间作显著提高了玉米和马铃薯的地上部干重和根系干重,说明玉米与马铃薯间作时不仅促进了作物地上部和根系生长,也增加了其根系的固土能力,这可能是由于高位玉米与矮位马铃薯间作时,在作物生长前期由于玉米的遮荫程度较低较适于马铃薯生长,且马铃薯对光能竞争的反应增加了其地上部的生长,以获得更高层次的光能,在作物生长中期时玉米的遮荫作用较大,促进了马铃薯茎叶中的干物质转移到地下部分,促进其根系生长,因此间作条件下马铃薯的地上部和地下部生物量均增加<sup>[34-35]</sup>,这与马传功等<sup>[4]</sup>研究玉米与马铃薯间作对玉米农艺性

状的结果类似。本研究还得出玉米与马铃薯间作有间作产量优势,这与田双燕等<sup>[35]</sup>研究玉米与马铃薯间作对马铃薯生长和产量的影响结果一致。

### 3.5 土壤养分、酶活性、GRSP 和团聚体指标之间的相互关系

土壤酶活性的变化是土壤酶对土壤理化性质、土壤类型、植被等综合环境因素的响应<sup>[36]</sup>。GRSP 是土壤有机碳的主要成分,具有超强的黏性和抗分解性,当其进入土壤后可黏结土壤颗粒最终形成大团聚体<sup>[37]</sup>。本研究相关分析表明,pH,AN 与各指标间的关系均不显著,AP,OM 与蔗糖酶呈显著的负相关关系,这与谢奎等<sup>[38]</sup>研究结果不一致,可能与马铃薯、玉米品种以及土壤类型的不同有关。土壤 EE-GRSP, T-GRSP、脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶与  $R_{0.25}$ , MWD 间均呈显著正相关关系,说明在本研究条件下脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶以及 GRSP 显著影响玉米和马铃薯根际土壤大团聚体的形成和团聚体稳定性。马建辉等<sup>[37]</sup>研究发现,EE-GRSP, T-GRSP、脲酶与 MWD 呈显著正相关关系,本研究结果与其一致。进一步利用冗余分析得出,对土壤团聚体  $R_{0.25}$  和 MWD 的影响由大到小分别为过氧化氢酶>脲酶>EE-GRSP>酸性磷酸酶>T-GRSP,其中过氧化氢酶对的  $R_{0.25}$  和 MWD 的影响达到显著水平,说明在本研究的条件下过氧化氢酶是影响土壤团聚体组成和稳定的主要因子。

## 4 结论

(1) 与单作相比,玉米与马铃薯间作使玉米根际土壤的 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量分别显著增加了 29.95%,30.10%,使马铃薯根际土壤 OM, AP, T-GRSP 含量分别显著增加了 13.53%,46.53%,31.65%,EE-GRSP/T-GRSP 值显著降低了 14.19%。

(2) 除马铃薯间作的根际土壤蔗糖酶活性与单作相比有降低趋势外,玉米、马铃薯间作的脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性相比于相应的单作均显著增加,玉米的增幅为 17.63%~40.31%,马铃薯的增幅为 15.69%~34.79%。

(3) 与单作相比,玉米与马铃薯间作可促进玉米和马铃薯根际土壤大团聚体的形成(分别为>2 mm, 0.5~2 mm 粒级),且可显著增加两种作物根际土壤团聚体的  $R_{0.25}$  和 MWD 值。

(4) 与单作相比,玉米与马铃薯间作均可显著增加两种作物的地上部和根系的干重。玉米与马铃薯

间作时土地当量比为 1.81>1,具有间作产量优势。

(5) 相关性分析得出,EE-GRSP, T-GRSP、脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶均与团聚体的  $R_{0.25}$  和 MWD 呈显著正相关关系。冗余分析得出,各指标对团聚体指标的影响由大到小分别为过氧化氢酶>脲酶>EE-GRSP>酸性磷酸酶>T-GRSP,其中,过氧化氢酶是影响土壤团聚体组成和稳定的主要的影响因子。

### 参考文献:

- [1] 喻为,李忠武,黄金权,等.水力侵蚀影响下土壤有机碳和微生物数量动态变化特征[J].土壤学报,2015,52(2):423-430.  
Yu W, Li Z W, Huang J Q, et al. Dynamics of soil microbial population and organic carbon under water erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015,52(2):423-430.
- [2] 陈正发,史东梅,金慧芳,等.基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J].农业工程学报,2019,35(3):256-267.  
Chen Z F, Shi D M, Jin H F, et al. Evaluation on cultivated-layer soil quality of sloping farmland in Yunnan based on soil management assessment framework (SMAF)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(3):256-267.
- [3] 康佩佩,查轩,刘家明,等.不同植被种植模式对红壤坡面侵蚀影响试验研究[J].水土保持研究,2016,23(4):15-18,22.  
Kang P P, Zha X, Liu J M, et al. Analysis of influence of different vegetation planting patterns on soil erosion on the red soil slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016,23(4):15-18,22.
- [4] 马传功,陈建军,郭先华,等.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[J].农业资源与环境学报,2016,33(1):72-79.  
Ma C G, Chen J J, Guo X H, et al. Effects of different cropping patterns on soil and water conservation benefits and soil nutrients loss on sloping land[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016,33(1):72-79.
- [5] 石雄高,李晓明,党建友,等.灌溉方式对石灰性褐土团聚体分布特征、稳定性及养分含量的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(9):1490-1500.  
Shi X G, Li X M, Dang J Y, et al. Effects of irrigation methods on distribution characteristics, stability and nutrient contents of calcareous brown soil aggregates[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022,30(9):1490-1500.
- [6] 马寰菲,胡汗,李益,等.秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系[J].环境科学,2021,42

- (9):4510-4519.
- Ma H F, Hu H, Li Y, et al. Stability of soil aggregates at different altitudes in Qinling mountains and its coupling relationship with soil enzyme activities[J]. *Environmental Science*, 2021,42(9):4510-4519.
- [7] 李涛,赵之伟.丛枝菌根真菌产球囊霉素研究进展[J]. *生态学杂志*, 2005,24(9):1080-1084.
- Li T, Zhao Z W. Advances in researches on glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005,24(9):1080-1084.
- [8] 夏梓泰,赵吉霞,李永梅,等.周年轮作休耕模式对土壤球囊霉素和团聚体稳定性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022,41(1):99-106.
- Xia Z T, Zhao J X, Li Y M, et al. Effect of annual rotation and fallow pattern on the soil glomalin and aggregate stability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022,41(1):99-106.
- [9] 安瞳昕,周锋,吴珍珍,等.坡耕地间作作物群体水土保持耕作措施[J]. *水土保持研究*, 2019,26(2):17-22.
- An T X, Zhou F, Wu Z Z, et al. Effect of crop intercropping on soil and water conservation in arable sloping land[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019,26(2):17-22.
- [10] 赵德强,元晋川,侯玉婷,等.玉米//大豆间作对 AMF 时空变化的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020,28(5):631-642.
- Zhao D Q, Yuan J C, Hou Y T, et al. Tempo-spatial dynamics of AMF under maize soybean intercropping [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020,28(5):631-642.
- [11] 唐秀梅,黄志鹏,吴海宁,等.玉米/花生间作条件下土壤环境因子的相关性和主成分分析[J]. *生态环境学报*, 2020,29(2):223-230.
- Tang X M, Huang Z P, Wu H N, et al. Correlation and principal component analysis of the soil environmental factors in corn/peanut intercropping system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020,29(2):223-230.
- [12] 李善家,王军强,施志国,等.不同基肥处理对玉米土壤酶活性和球囊霉素相关土壤蛋白的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2017,23(2):357-363.
- Li S J, Wang J Q, Shi Z G, et al. Effect of different base fertilizer treatments on maize soil enzyme activity and glomalin-related protein[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017,23(2):357-363.
- [13] Philippot L, Raaijmakers J M, Lemanceau P, et al. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2013,11(11):789-799.
- [14] 芦美,王婷,范茂攀,等.间作对马铃薯根系及坡耕地红壤结构稳定性的影响[J]. *水土保持研究*, 2023,30(2):67-73.
- Lu M, Wang T, Fan M P, et al. Effects of intercropping on the potato roots and soil structure stability in slopping land of red soil region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):67-73.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. *Soil Agrochemical Analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] Wright S F, Upadhyaya A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Soil Science*, 1996,161(9):575-586.
- [17] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京:中国农业出版社, 1986.
- Guan S Y. *Soil Enzyme and Its Research Methods*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [18] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986,50(3):627-633.
- [19] 张志兰,范志伟,王永刚,等.玉米马铃薯间作系统中玉米的恢复性生长[J]. *西南农业学报*, 2018,31(2):284-288.
- Zhang Z L, Fan Z W, Wang Y G, et al. Restorative growth of maize in maize and potato intercropping system[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018,31(2):284-288.
- [20] 张作为,史海滨,李仙岳,等.河套灌区间作系统根系土壤水盐运移机理及间作优势研究[J]. *水利学报*, 2017,48(4):408-416.
- Zhang Z W, Shi H B, Li X Y, et al. Research on the mechanism of water and salt transport in root soil and the advantage of intercropping system in Hetao irrigation district[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017,48(4):408-416.
- [21] Barreto R C, Madari B E, Machado P L O A, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO<sub>2</sub> in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil[J]. *Agric Ecosyst and Environ*, 2009,132(3):243-251.
- [22] 唐秀梅,钟瑞春,蒋菁,等.木薯/花生间作对根际土壤微生物生态的影响[J]. *基因组学与应用生物学*, 2015,34(1):117-124.
- Tang X M, Zhong R C, Jiang J, et al. The effect of cassava/peanut intercropping on microecology in rhizosphere soil[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2015,34(1):117-124.
- [23] 程伟威,王婷,范茂攀,等.玉米不同种植模式对坡耕地

- 红壤团聚体的影响[J].湖北农业科学,2019,58(15):33-38.
- Cheng W W, Wang T, Fan M P, et al. Effects of different planting patterns of maize on red soil aggregates in sloping farmland[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019,58(15):33-38.
- [24] Lin G, McCormack M L, Guo D. Arbuscular mycorrhizal fungal effects on plant competition and community structure[J]. Journal of Ecology, 2015,103(5):1224-1232.
- [25] 瓮巧云,黄新军,许翰林,等.玉米/大豆间作模式对青贮玉米产量、品质及土壤营养、根际微生物的影响[J].核农学报,2021,35(2):462-470.
- Weng Q Y, Huang X J, Xu H L, et al. Effects of corn/soybean intercropping model on yield, quality, soil nutrition and rhizosphere microorganisms of silage corn[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021,35(2):462-470.
- [26] 安瞳昕,杨圆满,周锋,等.间作对玉米马铃薯根系生长与分布的影响[J].云南农业大学学报:自然科学,2018,33(2):363-370.
- An T X, Yang Y M, Zhou F, et al. Effect of maize and potato intercropping on their root growth and distribution[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2018,33(2):363-370.
- [27] Brady N C, Wei R R. Organism and ecology of the soil[J]. The Nature and Properties of Soil, 1996,36(7):328-360.
- [28] 伏云珍,马琨,崔慧珍,等.间作作物种间相互作用对马铃薯根际土壤丛枝菌根真菌的影响[J].生态学杂志,2021,40(1):131-139.
- Fu Y Z, Ma K, Cui H Z, et al. Effects of interspecific interactions between intercropping crops on arbuscular mycorrhizal fungi in potato rhizosphere soil in the intercropping system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(1):131-139.
- [29] 阙弘,葛阳洋,康福星,等.南京典型利用方式土壤中球囊霉素含量及剖面分布特征[J].土壤,2015,47(4):719-724.
- Que H, Ge Y Y, Kang F X, et al. Content and distribution of glomalin-related soil protein in soils of Nanjing under different land use types[J]. Soils, 2015,47(4):719-724.
- [30] Milja V, Sanna K, Mauritz V, et al. Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001,33(12/13):1665-1672.
- [31] 张道勇,李会科,郭宏,等.间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J].水土保持研究,2015,22(5):39-45.
- Zhang D Y, Li H K, Guo H, et al. Effects of growing white clover on soil microbial biomass carbon and nitrogen and soil enzyme activity in apple-white clover intercropping system[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(5):39-45.
- [32] 向蕊,伊文博,赵薇,等.间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应[J].水土保持学报,2019,33(5):303-308.
- Xiang R, Yi W B, Zhao W, et al. Effects of intercropping on soil aggregate-associated organic carbon storage and nitrogen regulation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(5):303-308.
- [33] 杨帆,程金花,张洪江,等.坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J].农业机械学报,2016,47(5):129-137.
- Yang F, Cheng J H, Zhang H J, et al. Effect of herb plants on soil detachment and erosion dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5):129-137.
- [34] 王婷,李永梅,王自林,等.间作对玉米根系分泌物及团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):185-190.
- Wang T, Li Y M, Wang Z L, et al. Effects of intercropping on maize root exudates and soil aggregate stability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(3):185-190.
- [35] 田双燕,张应龙,何天久,等.马铃薯间作玉米对马铃薯生长、产量及糖类物质的影响[J].南方农业学报,2021,52(5):1198-1205.
- Tian S Y, Zhang Y L, He T J, et al. Effects of potato-maize intercropping on potato growth, yield and carbohydrate[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021,52(5):1198-1205.
- [36] 万忠梅,宋长春.土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J].土壤通报,2009,40(4):951-956.
- Wang Z M, Song C C. Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009,40(4):951-956.
- [37] 马建辉,叶旭红,韩昌东,等.膜下滴灌不同灌水控制下限对设施土壤团聚体养分、酶活性和球囊霉素含量的影响[J].应用生态学报,2018,29(8):2713-2720.
- Ma J H, Ye X H, Han C D, et al. Effects of different low limits of irrigation on nutrients, enzyme activity and glomalin-related soil protein in soil aggregates of drip irrigation under plastic film[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(8):2713-2720.
- [38] 谢奎,张腾,李卓远,等.榆林沙土区马铃薯根层土壤因子、微生物数量及酶活性特征[J].干旱地区农业研究,2022,40(4):192-205.
- Xie K, Zhang T, Li Z Y, et al. Characteristics of soil factors, microbial quantity and enzyme activity in potato root layer in Yulin sandy soil area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022,40(4):192-205.