

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.012

杨继芬, 李永梅, 李春培, 等. 不同种植模式对坡耕地红壤团聚体中酶活性及养分含量的影响. 土壤, 2023, 55(4): 787–794.

## 不同种植模式对坡耕地红壤团聚体中酶活性及养分含量的影响<sup>①</sup>

杨继芬, 李永梅, 李春培, 王璐, 芦美, 范茂攀, 赵吉霞\*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

**摘要:** 为探究不同种植模式下坡耕地红壤团聚体中的酶活性和养分含量, 为改善耕地质量提供理论依据, 以坡耕地红壤为研究对象, 设置大豆单作(DD)、玉米单作(MM)、大豆玉米间作(MD)、裸地(CK)4个处理, 利用干筛法获得 2~1、1~0.25、<0.25 mm 粒径团聚体, 并测定了其中的酶活性和养分含量。结果表明: ①与 CK、DD、MM 处理相比, MD 处理显著提高了 2~1 mm 粒径团聚体的含量, 增幅分别为 22.2%、13.3%、16.2%。②MD 处理显著提高了 2~1 mm 粒径团聚体中的有机质、有效磷、碱解氮含量, 分别较 DD 和 CK 处理提高 11.9%、29.2%, 51.1%、57.5% 和 16.5%、29.1%; 速效钾含量均表现为 DD 处理显著高于 CK、MM、MD 处理。③与 CK、DD、MM 处理相比, MD 处理显著提高了 2~1 mm 和 1~0.25 mm 粒径团聚体中的脲酶活性, 增幅分别为 61.0%、18.8%、14.5% 和 65.0%、17.9%、13.8%, 显著提高 2~1 mm 粒径团聚体中的蔗糖酶活性和 <0.25 mm 粒径团聚体中的酸性磷酸酶活性, 增幅分别为 63.8%、57.1%、32.8% 和 80.4%、44.3%、74.1%。④冗余分析表明, 2~1 mm 粒径团聚体中的脲酶和蔗糖酶活性与有效磷、有机质含量显著正相关, 1~0.25 mm 粒径团聚体中的酶活性与有机质、有效磷、碱解氮含量显著正相关, <0.25 mm 粒径团聚体中的酶活性与碱解氮、有效磷含量显著正相关。研究表明, 合理的种植模式不仅可以促进大团聚体的形成, 还能提高大团聚体中的酶活性和养分含量, 从而提高土壤肥力, 改善耕地质量。

**关键词:** 种植模式; 坡耕地; 团聚体; 酶活性

**中图分类号:** S158.3 **文献标志码:** A

### Effects of Different Planting Patterns on Enzyme Activities and Nutrient Contents in Red Soil Aggregates in Sloping Farmland

YANG Jifen, LI Yongmei, LI Chunpei, WANG Lu, LU Mei, FAN Maopan, ZHAO Jixia\*

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

**Abstract:** The aim of this study is to explore enzyme activities and nutrient contents in red soil aggregates under different planting patterns, and to provide the theoretical basis for improving the quality of cultivated land. Four treatments, soybean monoculture (DD), corn monoculture (MM), soybean maize intercropping (MD) and bare soil (CK), were used to obtain aggregates with 2–1, 1–0.25 and <0.25 mm sizes by dry screening method, and enzyme activities and nutrient contents in aggregates were measured. The results showed as follows: 1) Compared with CK, DD and MM, MD significantly increased the contents of 1–2 mm aggregates by 22.2%, 13.3% and 16.2%, respectively. 2) MD significantly increased the contents of organic matter, available phosphorus and alkylizable nitrogen in 2–1 mm aggregates. Compared with DD and CK, MD significantly increased the contents of organic matter, available phosphorus and alkylizable nitrogen in 2–1 mm aggregates by 11.9%, 29.2%, 51.1%, 57.5% and 16.5%, 29.1%, respectively. The content of available potassium in DD was significantly higher than those in CK, MM and MD. 3) Compared with CK, DD and MM, MD significantly increased urease activity in 2–1 mm and 1–0.25 mm aggregates by 61.0%, 18.8%, 14.5% and 65.0%, 17.9%, 13.8%, respectively. The activities of sucrase in 2–1 mm aggregates and acid phosphatase in <0.25 mm aggregates were significantly increased by 63.8%, 57.1%, 32.8% and 80.4%, 44.3%, 74.1%, respectively. 4) RDA showed that the activities of urease and sucrase in 2–1 mm aggregates were significantly positively correlated with the contents of available phosphorus and organic matter. In addition, enzyme activities in 1–0.25 mm aggregates

①基金项目: 云南省科技重大专项子课题(2019ZG00902-08), 国家自然科学基金青年基金项目(42007002)和国家自然科学基金地区科学基金项目(41661063)资助。

\* 通讯作者(zhaojixiacc@163.com)

作者简介: 杨继芬(1996—), 女, 云南富民人, 硕士研究生, 主要从事坡耕地水土保持研究。E-mail: 2023894007@qq.com

were significantly positively correlated with the contents of organic matter, available phosphorus and alkali-hydrolyzed nitrogen, while those in <0.25 mm aggregates were significantly positively correlated with the contents of alkali-hydrolyzed nitrogen and available phosphorus. The results prove that reasonable planting patterns can not only promote the formation of large soil aggregates, but also increase their enzyme activities and nutrient contents, thus, can improve soil fertility and cultivated land quality.

**Key words:** Planting patterns; Sloping farmland; Aggregate; Enzyme activity

云南省耕地以坡耕地为主, 极易发生水土流失, 同时不合理的利用和耕作管理, 导致土壤侵蚀情况进一步加剧<sup>[1]</sup>, 最终导致山区农业土壤退化和植物生产力下降<sup>[2]</sup>。合理的作物种植模式可以显著提高光热水肥的利用效率及土壤团聚体的稳定性<sup>[3]</sup>, 有效降低土壤侵蚀。间作往往是一种有效的土地利用和可持续农业实践, 可以改善土壤微生态环境, 促进土壤养分的高效利用<sup>[4]</sup>。已有大量的研究表明, 与单作相比, 间作能显著增强土壤团聚体的稳定性和提高土壤的酶活性<sup>[5-8]</sup>, 但这些研究主要针对整体土壤。土壤酶是生态系统中养分循环的重要动力, 其活性可以作为土壤质量的指标<sup>[7,9]</sup>。研究特定条件下, 不同粒径团聚体中的酶活性具有重要意义。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单位<sup>[10]</sup>, 决定着土壤养分的积累与转化, 是调节土壤水、肥、气、热的关键场所, 在保持土壤孔隙度、持水量、渗透性及减少土壤侵蚀等方面起着至关重要的作用<sup>[11-12]</sup>。团聚体中的土壤养分在提高土壤肥力的同时也改变了土壤团聚体的粒径分布, 从而影响了团聚体的稳定性<sup>[13]</sup>。而由于团聚体中养分、通气和水分等条件的不同, 造成了微生物和酶参与的养分转化特性的差异<sup>[14]</sup>。因此, 有必要明确不同粒径团聚体中的酶活性和养分含量。

目前, 有不少学者对不同种植模式下土壤酶活性和养分的变化做了大量的研究, 但这些研究主要以整体土壤为研究对象, 而针对不同粒径团聚体的研究较少。有研究表明, 不同粒径团聚体的形成环境和胶结物质不同, 团聚体内部的物质组成和稳定性也有差异<sup>[10]</sup>, 从而导致不同粒径土壤团聚体中酶活性的差异。由此, 本研究以坡耕地红壤为研究对象, 研究坡耕地土壤团聚体中酶活性和养分含量变化特征及对不同种植模式的响应, 以期提升坡耕地土壤肥力、保障土壤健康、减少水土流失以及促进土壤资源可持续利用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

田间定位试验始于 2013 年, 其间处理和施肥均

保持一致。本试验于 2021 年 5—10 月在云南农业大学后山试验小区(25°8'18"N, 102°45'58"E)开展。该区的年均降雨量为 960 mm, 年均气温为 14.2 °C, 平均海拔为 1 950 m, 坡向为北偏西 57°, 是云南省典型的坡耕地红壤水土流失区。供试土壤类型为山原红壤, 基本理化性质为: 有机质 39.25 g/kg, 全氮 0.75 g/kg, 有效磷 9.52 mg/kg, 碱解氮 55.25 mg/kg, 速效钾 155 mg/kg, pH 6.10。供试大豆品种为滇豆 7 号, 玉米品种为乔单 6 号。

### 1.2 试验设计

试验共设置 4 个处理, 包括大豆单作(DD)、玉米单作(MM)、大豆玉米间作(MD)、裸地(CK), 每个处理设置 3 个重复, 共 12 个小区。每个小区面积均为 4 m×7 m, 各小区间隔 40 cm。玉米单作采用宽窄行种植, 宽行 80 cm, 窄行 40 cm, 株距 25 cm。大豆单作采用等行距种植, 行距 60 cm, 株距 25 cm; 间作采用 2:2 种植模式, 玉米与玉米间行距 40 cm, 大豆与大豆间行距 40 cm, 玉米与大豆间行距 50 cm, 株距均为 30 cm。各小区的播种方式均为穴播, 玉米每穴播种 2 粒, 大豆每穴播种 4 粒, 后期玉米每穴留 1 株, 大豆每穴留 2 株。每年播种前用锄头整地, 轻微翻动表土, 各小区一致。

单作玉米每公顷施 N 250 kg、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg、K<sub>2</sub>O 120 kg, 其中氮肥分 3 次施入(基肥 35%, 小喇叭口期追 30%, 大喇叭口期追 35%)。大豆每公顷施 N 120 kg、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 240 kg、K<sub>2</sub>O 180 kg, 全作为基肥一次性施入。间作条件下玉米、大豆施肥量与各自单作相同。施肥方式为穴施, 各小区一致。

### 1.3 样品采集与分析

于 2021 年 8 月 15 日采集玉米抽雄期的土壤样品, 每个小区采用五点取样法采集 0~20 cm 土层非根际土, 混合成 1 个土壤样品, 玉米和大豆单作处理分别采集玉米和玉米、大豆和大豆之间的行间土, 玉米大豆间作采集玉米和大豆之间的行间土。将采集后的土壤样品放入硬质塑料盒内, 尽量避免挤压, 以保持原状土壤结构带回实验室风干。

采用干筛法进行土壤团聚体分级<sup>[15]</sup>: 称取等量

风干样品置于套筛顶部振荡,左右振幅为 10 cm,频率为 150 次/min,振荡时间为 2 min,随后称重,计算机械性团聚体各粒级质量分数。筛分的 2~1、1~0.25 mm 及 <0.25 mm 粒径土壤团聚体,测定其中的酶活性和养分含量。其中,脲酶和蔗糖酶活性按照《土壤酶及其研究法》<sup>[16]</sup>进行测定,酸性磷酸酶活性采用土壤酸性磷酸酶试剂盒(上海优选生物科技有限公司)检测,酶活性单位用  $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot 24\text{h})$  表示。

土壤养分含量根据《土壤农化分析》测定<sup>[17]</sup>。

#### 1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2016 进行预处理,运用 SPSS17.0 进行方差分析,其中,采用双因素方差分析分析不同粒级、不同种植模式对土壤养分与酶活性的影响及其交互作用,单因素方差分析分析同一粒径不同种植模式下的酶活性和养分含量及同一种种植模式不同粒径下的酶活性和养分含量的差异显著性,事后多重比较采用 Duncan 法( $P<0.05$ )。采用 Origin 2018 作图,Canoco 5 进行冗余分析(RDA),并生成 RDA 图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤团聚体粒径分布

由表 1 可知,不同种植模式处理土壤均表现为 2~1 mm 和 1~0.25 mm 粒径团聚体含量最高,二者占比总团聚体的 67.7%~71.8%,且显著性差异仅体现在 2~1 mm 和 <0.25 mm 粒级。其中,MD 处理显著提升了 2~1 mm 粒径团聚体质量分数,分别较 MM、DD、CK 处理提高 16.2%、13.3% 和 22.2%。而 MD 处理显著降低了 <0.25 mm 粒径团聚体质量分数,分别较 MM、DD、CK 处理降低 23.5%、14.2%、21.4%。

表 1 不同种植模式下土壤团聚体粒径分布

Table 1 Soil aggregate size distribution under different planting patterns

处理	团聚体组成			
	>2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	<0.25 mm
CK	10.8±1.0 Ca	33.4±0.3 Ab	34.3±3.3 Aa	21.5±2.6 Bab
DD	10.5±2.3 Ca	36.0±2.2 Ab	33.8±1.5 Aa	19.7±2.2 Bab
MM	9.4±1.3 Ca	35.1±1.2 Ab	33.4±0.8 Aa	22.1±1.6 Ba
MD	11.3±0.76 Ca	40.8±1.0 Aa	31.0±2.7 Aa	16.9±3.5 Bb

注:CK 表示裸地对照,DD 表示大豆单作,MM 表示玉米单作,MD 表示玉米大豆间作;表中同列不同小写字母表示同一粒径不同处理间差异显著( $P<0.05$ ),同行不同大写字母表示同一种种植模式不同粒径间差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.2 土壤团聚体中的养分含量

由表 2 可知,种植模式对土壤各养分含量均有显

著影响,粒径对团聚体中养分含量的显著影响体现在有效磷和速效钾上。种植模式和粒径的交互作用对有效磷、碱解氮、速效钾含量具有显著影响。

表 2 种植模式和粒径对土壤养分含量的双因素方差分析  
Table 2 Two-factor variance analysis of cropping pattern and aggregate size on nutrient contents in aggregates

因素	有机质	有效磷	碱解氮	速效钾	全氮
种植模式	***	***	***	***	***
粒径	NS	***	NS	***	NS
种植模式×粒径	NS	*	***	*	NS

注:\*、\*\*、\*\*\*分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 水平影响显著,NS 表示无显著影响;下同。

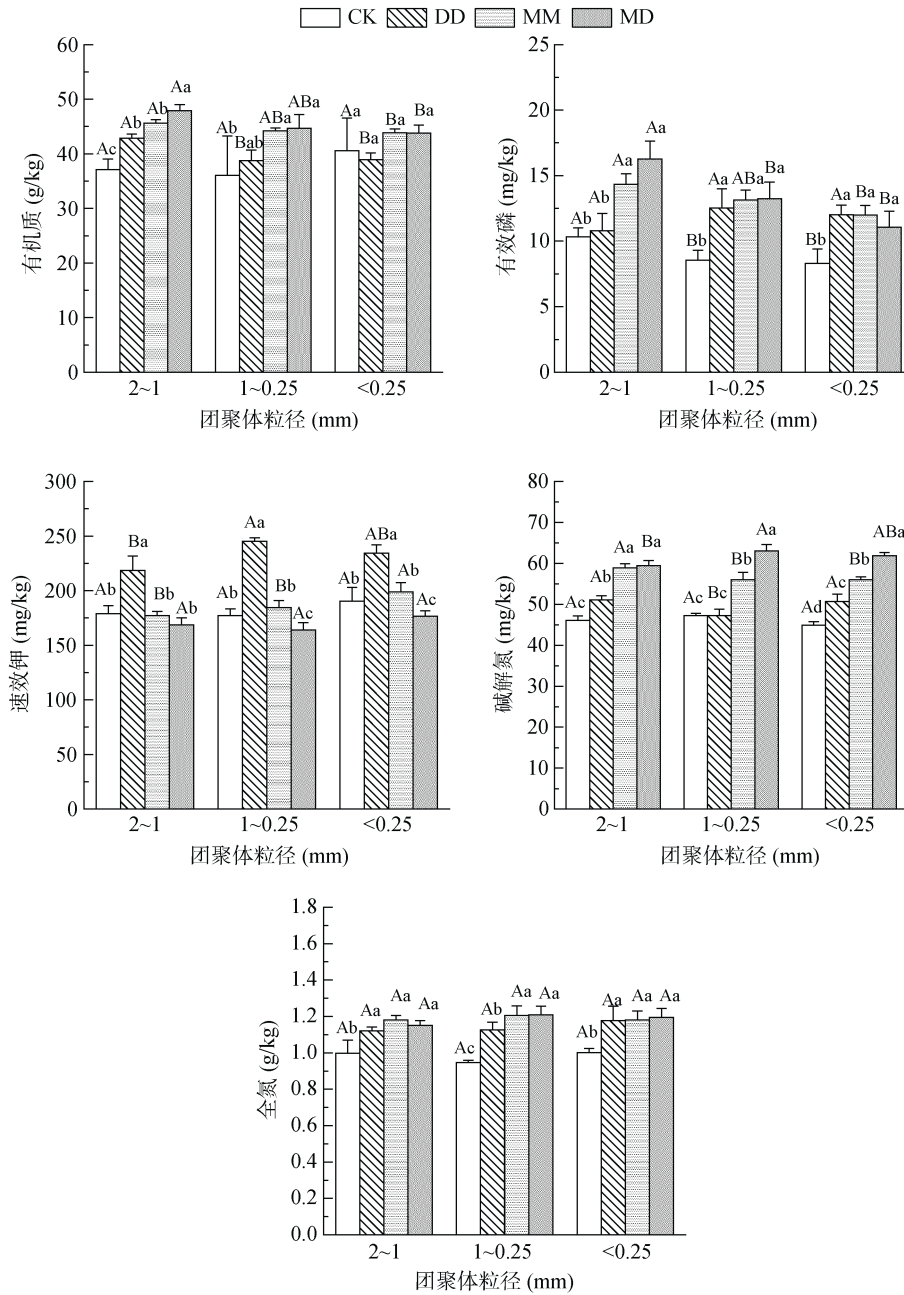
由图 1 可知,从团聚体粒径看,有机质含量除 CK 处理外,其他处理均表现为 2~1 mm 粒径团聚体中最高,且差异性仅体现在 2~1 mm 和 1~0.25 mm 粒径团聚体中。有效磷含量除 DD 处理外,其他处理均表现为 2~1 mm 粒径团聚体中最高,且差异性仅体现在 2~1 mm 粒径团聚体中。速效钾和碱解氮含量,各处理无明显规律,全氮含量各处理均无显著差异。

从不同种植模式看,MD 处理显著提升了 2~1 mm 粒径团聚体中的有机质含量,分别较 MM、DD、CK 提升 5.0%、11.9%、29.2%,且 MD 处理与 CK 处理相比,显著提高了 1~0.25 mm 粒径团聚体中的有机质含量。有效磷含量在 2~1 mm 粒径团聚体中 MD 处理与 DD 和 CK 处理相比,分别显著提高 51.1%、57.5%( $P<0.05$ )。而速效钾含量表现为 MD 处理显著降低 2~1、1~0.25、<0.25 mm 粒径含量,分别较 CK 处理降低 5.1%、22.4%、4.2%,较 DD 处理降低 7.5%、33.1%、11.2%,较 MM 处理降低 3.0%、21.2%、7.1%。此外 MD 处理显著提高了 1~0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体中的碱解氮含量,分别较 MM、DD、CK 处理提高 12.5%、33.3%、33.3% 和 10.4%、21.8%、37.6%。全氮含量在各粒径团聚体中均表现为 MD 处理显著高于 CK 处理。

### 2.3 土壤团聚体中的酶活性

由表 3 可知,粒径和种植模式对团聚体中酶活性均有显著影响,且二者的交互作用对脲酶和酸性磷酸酶具有显著影响。

图 2 显示,从团聚体粒径看,各处理的脲酶活性均表现为 2~1 mm 和 1~0.25 mm 粒径团聚体中最高。蔗糖酶活性除 MM 处理外,各处理均无显著性差异。酸性磷酸酶活性表现为 MD 处理在 <0.25 mm 粒径中最高,CK 和 DD 处理在 2~1 mm 粒径团聚体中最高。



(图中不同小写字母表示同一粒径不同种植模式间差异显著( $P<0.05$ ), 不同大写字母表示同一种种植模式不同粒径间差异显著( $P<0.05$ ); 下同)

图 1 不同种植模式下各粒径团聚体中养分含量

Fig. 1 Nutrient contents in aggregates of different sizes under different cropping patterns

表 3 种植模式和粒径对土壤酶活性的双因素方差分析

Table 3 Two-factor variance analysis of cropping pattern and aggregate size on enzyme activities in aggregates

因素	脲酶	蔗糖酶	酸性磷酸酶
种植模式	***	**	***
粒径	***	***	***
种植模式×粒径	***	NS	***

从不同种植模式看(图 2), MD 处理显著提高了 2~1 mm 和 1~0.25 mm 粒径团聚体中的脲酶含量,

分别较 CK、DD、MM 处理提高 61%、18.8%、14.5% 和 65%、17.9%、13.8%, 而 MD 与 MM 处理相比, 显著降低了<0.25 mm 粒径团聚体中的脲酶活性。蔗糖酶活性表现为 MD 处理较 CK、DD 处理显著提高 2~1、1~0.25、<0.25 mm 粒径团聚体中的酶活性, 分别提高 63.8%、57.1%、42.9%、40% 和 62.5%、44.4%。MD 处理显著提高 1~0.25 mm 和<0.25 mm 粒径团聚体中的酸性磷酸酶活性, 分别较 CK、DD、MM 处理提高 7.1%、13.2%、6.7% 和 80.4%、44.3%、74.1%;

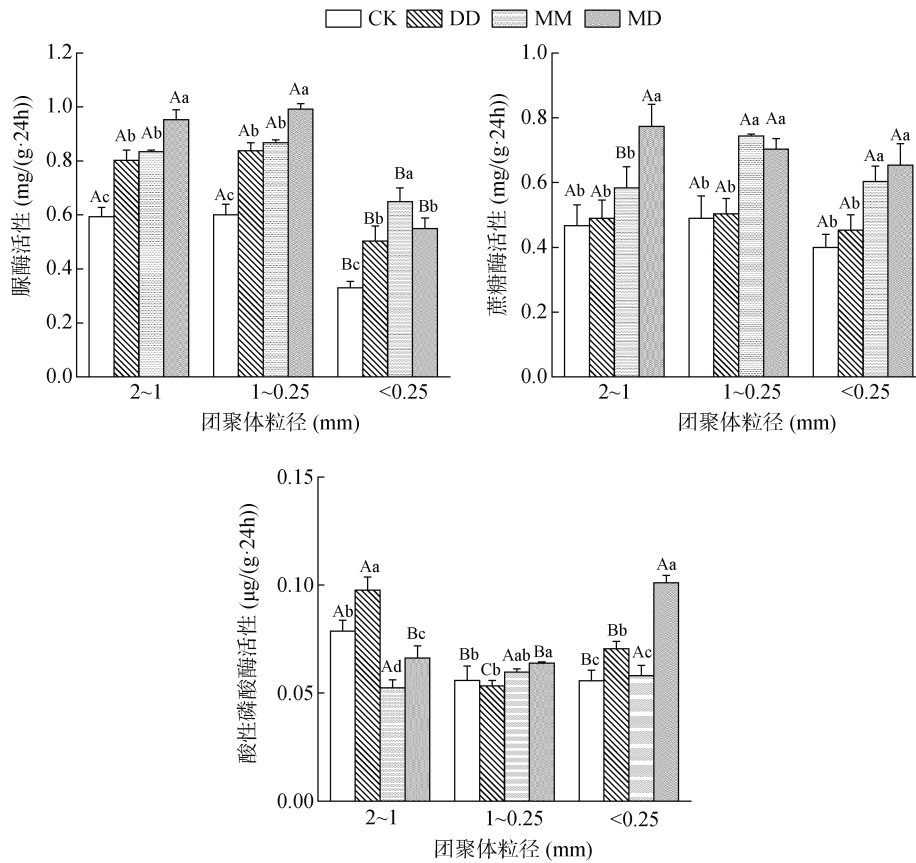


图 2 不同种植模式下各粒径团聚体中的酶活性  
Fig. 2 Enzyme activities in aggregates of different sizes under different cropping patterns

而与CK、DD处理相比,MD处理显著降低了2~1 mm 粒径团聚体中的磷酸酶活性,降幅为 16.5%、32.7%。

### 2.4 环境因子与土壤团聚体中酶活性的相关性

如表 4 所示,团聚体中的脲酶、蔗糖酶活性与有机质、有效磷、碱解氮、全氮含量极显著正相关 ( $P<0.01$ )。冗余分析(图 3)表明,不同粒径团聚体中影响酶活性的养分各不相同。2~1 mm 粒径团聚体中的脲酶和蔗糖酶活性与该粒径中的有机质、有效磷、碱解氮含量显著正相关,其中有效磷对该粒径团聚体中酶活性的影响最大。1~0.25 mm 粒径团聚体中的

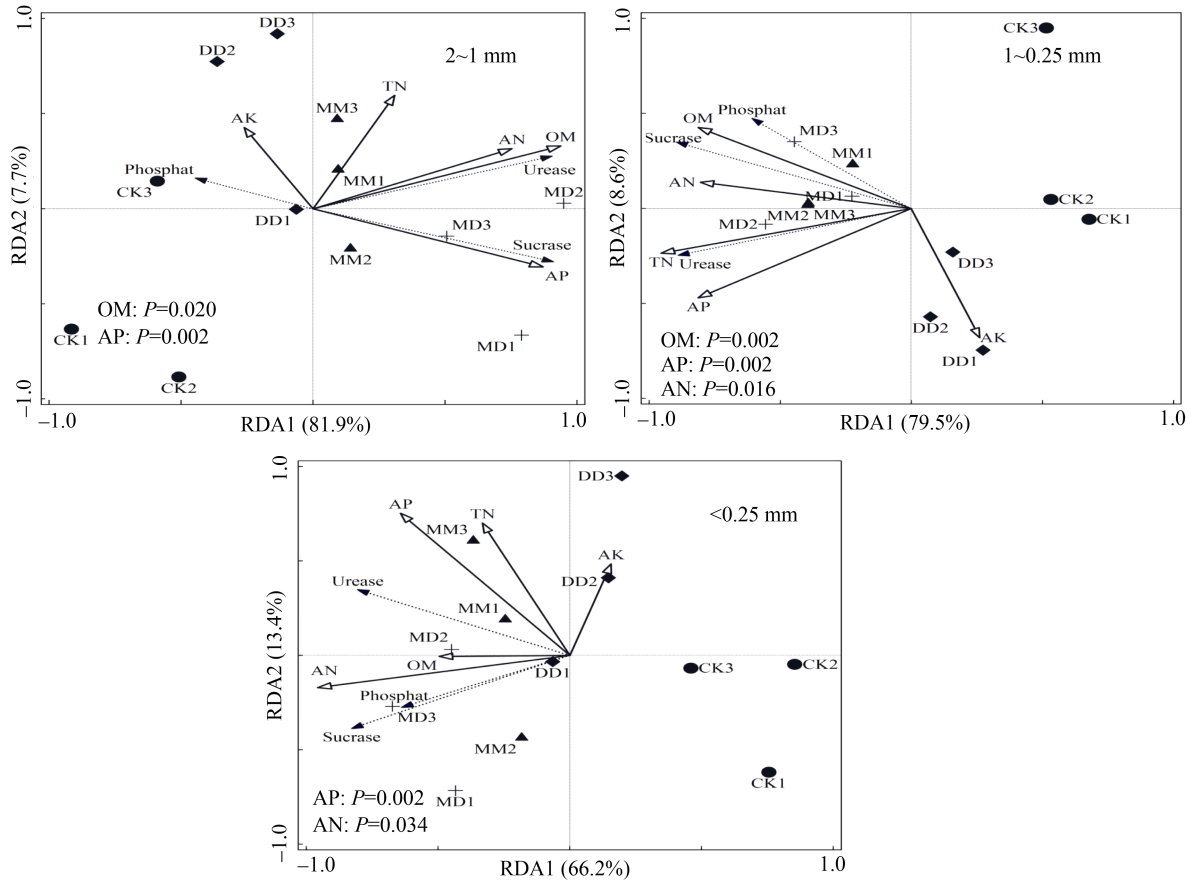
酶活性与该粒径中的有机质、碱解氮含量显著正相关,其中有机质对该粒径团聚体中的酶活性影响最大,<0.25 mm 粒径团聚体中的酶活性与有效磷、碱解氮含量极显著正相关,且碱解氮的影响最大。

### 3 讨论

土壤团聚体是土壤结构的重要组成部分<sup>[18]</sup>,是土壤环境中微生物的营养载体<sup>[19]</sup>。土壤团聚体影响养分有效性、酶活性及土壤生物地球化学过程,如生物活性、植物生长和土壤抗侵蚀能力<sup>[20]</sup>。本研究发

表 4 酶活性与养分含量的相关性分析  
Table 4 Correlation analysis between enzyme activities and nutrient contents

	有机质	有效磷	速效钾	碱解氮	全氮	脲酶	蔗糖酶	酸性磷酸酶
有机质	1	0.541**	-0.292	0.632**	0.586**	0.449**	0.629**	0.042
有效磷		1	-0.135	0.608**	0.630**	0.693**	0.611**	-0.154
速效钾			1	-0.448**	0.078	-0.195	-0.432**	0.073
碱解氮				1	0.731**	0.548**	0.775**	0.166
全氮					1	0.506**	0.548**	0.097
脲酶						1	0.651**	-0.129
蔗糖酶							1	0.022
酸性磷酸酶								1



(Urease: 脲酶活性, Sucrase: 蔗糖酶活性, Phosphat: 磷酸酶活性, OM: 有机质, TN: 全氮, AK: 速效钾, AP: 有效磷, AN: 碱解氮)

图 3 各粒径团聚体中酶活性与土壤养分的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis between enzyme activities and nutrients in aggregates of different sizes

现,不同种植模式下均显著提高 2~1 mm 大团聚体和 1~0.25 mm 小团聚体的含量,这与乌达木等<sup>[21]</sup>研究结果相似。这主要是因为铁铝氧化物是南方红壤地区微团聚体的胶结物质,70% 以上的土壤有机碳存在于粉-黏团聚体中,而大团聚体的主要胶结物质是有机质,有机质将微团聚体胶结成大团聚体<sup>[9]</sup>。并且作物种植后新鲜有机物质的输入,作物根系、微生物及他们的代谢产物增多<sup>[22]</sup>,土壤中有有机胶结物质的量也增多,从而促进了大粒径团聚体的形成。此外,在本研究中,与单作相比,间作显著提高了 2~1 mm 粒径团聚体的质量分数,这与王婷等<sup>[3]</sup>、孙涛等<sup>[5]</sup>研究结果一致。这是因为根系生物量和根长密度对团聚体的形成和稳定起着重要作用,间作模式显著增加了玉米和大豆的总根长、总根面积,固土能力增强,将微团聚体缠绕固结形成大团聚体<sup>[3]</sup>。另外,由于两根系的交互作用,促使根系分泌物增加和微生物活力增强,植物根系和真菌菌丝分泌多糖及其他有机复合物促进了土壤颗粒和微团聚体的黏结,这有利于微团聚体转化为大颗粒团聚体<sup>[22]</sup>。

土壤有机碳、氮、磷等可以提升胶结物质胶结能力,从而降低团聚体的破坏程度,促进团聚体的形成和稳定<sup>[23]</sup>。本研究发现,各处理下的有机质和有效磷含量在大粒径团聚体中最高,全氮含量在各粒径团聚体间无显著差异。葛楠楠等<sup>[24]</sup>研究指出,养分在大团聚体中含量较高,其含量与团聚体的数量和稳定性显著正相关,本研究结果与之相似,说明大粒径团聚体相较于微团聚体能够保持更高的营养水平;相反,马建辉<sup>[13]</sup>等研究发现,有机碳、全磷、全氮等含量在微团聚体中较高,这种差异可能是由于作物种类、土壤类型及耕作方式不同造成的。说明团聚体中的土壤养分在提高土壤肥力的同时也改变了土壤团聚体的粒径分布,从而影响团聚体的稳定性。此外,种植模式对土壤养分含量也有显著影响。本研究中,MD 处理显著提高了 2~1 mm 粒径团聚体中的有机质和有效磷含量,及 1~0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体中的碱解氮含量。王鹏等<sup>[6]</sup>研究发现,桔梗大葱间作提高了土壤有效氮、有效磷含量。李孝梅等<sup>[25]</sup>研究发现,不同间作模式下均显著提高大粒径团聚体

中的有机碳、氮含量。孟炎奇<sup>[26]</sup>研究发现,枣树和苜蓿间作显著提高各粒级团聚体中的有机碳、氮、磷的含量。本研究结果与以上研究相似,这可能是由于作物生长过程中以根系分泌的方式向土壤中输送碳、氮等有机化合物,从而影响土壤养分含量。由于不同种植模式根系分泌物数量和种类的差异造成土壤养分含量不同,豆科与禾本科间作根系分泌物的种类和数量显著大于单作,且根系密度高,活性强,使土壤养分转化效率和土壤有效养分含量提高<sup>[6]</sup>。此外,本研究还发现,间作处理下的速效钾含量较单作低,这可能是由于土壤养分比例失调造成的。已有研究表明,土壤养分比例失调易产生离子拮抗,抑制植物对离子的吸收<sup>[6]</sup>,连作造成土壤有效氮磷钾比例失调<sup>[27]</sup>。本试验地大豆、玉米单作地连续种植多年,连作造成土壤养分失调,导致钾吸收障碍,这可能是单作土壤速效钾含量高于间作的主要原因。

土壤酶是土壤生态系统中养分循环的重要驱动力,也是评价土壤肥力的指标之一<sup>[28]</sup>。不同粒径团聚体中的酶活性存在显著差异。本研究发现,同一种种植模式下脲酶活性均以大粒径团聚体最高,且显著高于小团聚体,这与曹良元等<sup>[19]</sup>研究结果相似。这可能是由于大团聚体结构和孔隙分布有利于微生物生长,而土壤团聚体粒径越大,有机物相对越多,这为酶促反应提供了更多易利用的基质,从而增强了酶活性<sup>[29]</sup>。张帅等<sup>[30]</sup>研究表明,大团聚体中的酶活性显著高于小团聚体,这是因为土壤微生物代谢活动影响着酶活性,分布在大团聚体中的微生物比小团聚体丰富,所以大团聚体中的酶活性比小团聚体高<sup>[31]</sup>。这也是导致大多数酶分布在大团聚体中的重要原因。另外,由微团聚体颗粒与有机碳的胶结、根系与菌丝的缠绕作用而逐渐形成大团聚体,其中包裹着较多的颗粒有机碳,为酶提供了充足的基质<sup>[32]</sup>。本研究中还发现,不同粒径团聚体中的蔗糖酶活性差异不显著,MD处理下的酸性磷酸酶活性在小粒径团聚体中最高,说明不同种类酶在不同类型土壤、不同级别团聚体中的活性存在差异,土壤利用方式、土壤类型、物质组成及生物群落等均可能对其产生影响<sup>[32]</sup>。此外,种植模式对酶活性也有显著影响,在本研究与单作相比,间作显著提高了2~1 mm和1~0.25 mm粒径团聚体中的脲酶活性、2~1 mm粒径团聚体中的蔗糖酶活性和<0.25 mm粒径团聚体中的酸性磷酸酶活性。同样地,沈雪峰等<sup>[33]</sup>研究发现,花生与甘蔗间作显著提高了脲酶和磷酸酶活性。这是因为间作中两种作物根系之间相互交叉,根系分泌物的成分和含量

发生改变,为根际微生物提供纤维素、糖类等养分来改变根际微环境,促使微生物代谢活性增强,间接导致酶活性增强<sup>[6-7]</sup>。

已有大量研究表明,土壤酶活性与土壤养分具有显著的相关性<sup>[8,28]</sup>。本研究发现,有效磷、有机质、碱解氮是影响酶活性的主要因子。代会会等<sup>[8]</sup>在大豆与番茄间作中发现,土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶活性与土壤氮、磷、钾及有机质含量之间有着显著或极显著的相关性;Ma等<sup>[34]</sup>研究表明,土壤养分有效性土壤酶活性高度相关,这可能是它们的正反馈调节作用导致的。说明土壤酶活性的分布与土壤中主要养分的分布密切相关,可以代表土壤肥力水平和作为衡量土壤肥力的生物指标。

## 4 结论

1) 在田间试验条件下,间作模式显著提高了坡耕地红壤2~1 mm大粒径团聚体的含量及该粒径团聚体中的有机质、有效磷、碱解氮含量;显著提高了2~1 mm和1~0.25 mm粒径团聚体中的脲酶活性和2~1 mm粒径团聚体中的蔗糖酶活性及<0.25 mm粒径团聚体中的酸性磷酸酶活性。

2) 冗余分析表明,团聚体中的有机质、碱解氮及有效磷含量是酶活性变化的主导因子,而且有机质和有效磷含量对各粒径团聚体中酶活性的影响最大。

## 参考文献:

- [1] 张立芸,段青松,范茂攀,等.玉米和大豆根系对滇中地区坡耕地红黏土抗剪强度的影响[J].土壤学报,2022,59(6):1527-1539.
- [2] Xiao L, Huang Y M, Zhao J F, et al. Effects of planting structure on soil water-stable aggregates, microbial biomass and enzyme activity in a catchment of Loess Plateau Terraces, China[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 159: 103819.
- [3] 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.
- [4] Fu Z D, Zhou L, Chen P, et al. Effects of maize-soybean relay intercropping on crop nutrient uptake and soil bacterial community[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(9): 2006-2018.
- [5] 孙涛,冯晓敏,赵财,等.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[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):874-881.
- [6] 王鹏,祝丽香,陈香香,等.桔梗与大葱间作对土壤养分、微生物区系和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):668-675.
- [7] 赵雅姣,刘晓静,吴勇,等.西北半干旱区紫花苜蓿-小黑麦间作对根际土壤养分和细菌群落的影响[J].应用生

- 态学报, 2020, 31(5): 1645–1652.
- [8] 代会会, 胡雪峰, 曹明阳, 等. 豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 911–918.
- [9] Gong X W, Liu C J, Li J, et al. Responses of rhizosphere soil properties, enzyme activities and microbial diversity to intercropping patterns on the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104355.
- [10] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J/OL]. 土壤学报: 1–18[2023-05-24].
- [11] Liu D D, Ju W L, Jin X L, et al. Associated soil aggregate nutrients and controlling factors on aggregate stability in semiarid grassland under different grazing prohibition timeframes[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 777: 146104.
- [12] 赵桂茹, 安瞳昕, 欧阳铖人, 等. 青贮玉米氮投入对坡耕地土壤侵蚀及水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 72–79.
- [13] 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.
- [14] 牛文静, 李恋卿, 潘根兴, 等. 太湖地区水稻土不同粒级团聚体中酶活性对长期施肥的响应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2181–2186.
- [15] Bach E M, Williams R J, Hargreaves S K, et al. Greatest soil microbial diversity found in micro-habitats[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 118: 217–226.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 1981.
- [18] 宋依依, 曹阳, 段鑫盈, 等. 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 344–350.
- [19] 曹良元, 张磊, 蒋先军, 等. 长期垄作免耕对不同大小土壤团聚体中几种氮素形态分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 824–830.
- [20] Kumar A, Dorodnikov M, Splettstößer T, et al. Effects of maize roots on aggregate stability and enzyme activities in soil[J]. *Geoderma*, 2017, 306: 50–57.
- [21] 乌达木, 范茂攀, 赵吉霞, 等. 不同种植模式下坡耕地红壤团聚体有机碳矿化特征[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1519–1528.
- [22] 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.
- [23] 赵永超, 李晓鹏, 闫一凡, 等. 激发式秸秆还田对麦季潮土团聚体中酶活性的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3): 498–507.
- [24] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1626–1632.
- [25] 李孝梅, 李永梅, 乌达木, 等. 玉米间作大豆、萝卜对红壤不同粒径水稳性团聚体碳氮分布的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(1): 104–111.
- [26] 孟炎奇. 不同间距对枣树苜蓿间作系统土壤团聚体及养分的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021.
- [27] 祝丽香, 霍学慧, 孙洪信, 等. 桔梗连作对土壤理化性状和生物学性状的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 177–181.
- [28] 范祎玮, 信秀丽, 钟新月, 等. 玉米豆科覆盖作物间作对潮土酶活性和真菌群落特征的影响[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1236–1243.
- [29] 马瑞萍, 安韶山, 党廷辉, 等. 黄土高原不同植物群落土壤团聚体中有机碳和酶活性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 104–113.
- [30] 张帅, 成宇阳, 吴行, 等. 生物炭施用下潮土团聚体微生物量碳氮和酶活性的分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 369–379.
- [31] Liao H, Zhang Y C, Wang K, et al. Complexity of bacterial and fungal network increases with soil aggregate size in an agricultural Inceptisol[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 154: 103640.
- [32] 钟晓兰, 李江涛, 李小嘉, 等. 模拟氮沉降增加条件下土壤团聚体对酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1422–1433.
- [33] 沈雪峰, 方越, 董朝霞, 等. 甘蔗/花生间作对土壤微生物和土壤酶活性的影响[J]. 作物杂志, 2014(5): 55–58.
- [34] Ma Y H, Fu S L, Zhang X P, et al. Intercropping improves soil nutrient availability, soil enzyme activity and tea quantity and quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 119: 171–178.