

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.007.

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 Mei, WANG Ting, FAN Maopan, 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.

# 间作对马铃薯根系及坡耕地红壤结构稳定性的影响

芦美<sup>1</sup>, 王婷<sup>2</sup>, 范茂攀<sup>1</sup>, 赵吉霞<sup>1</sup>

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 南京农业大学 园艺学院, 南京 210095)

**摘 要:**为了揭示间作对马铃薯根系和坡耕地红壤结构稳定性的影响,田间试验采用随机区组设计,设置马铃薯单作、玉米马铃薯间作2个处理,测定马铃薯各生育阶段的土壤团聚体稳定性指标、根系形态特征及其分泌物含量,分析了不同种植模式下马铃薯的根系形态及其分泌物对土壤团聚体稳定性的影响。结果表明:(1)在同一种植模式下,除根平均直径外的马铃薯根系形态特征指标均随生育期的推移呈先增加后降低的趋势。在马铃薯的开花期和块茎膨大期,间作马铃薯根系总根长、总根表面积和总根体积与单作相比均较高,且在块茎膨大期间作马铃薯根系总根长、总根表面积和总根体积相对于单作分别显著增加了24.41%, 24.75%, 35.03% ( $p < 0.05$ )。 (2) 马铃薯根系分泌物总糖和总有机酸含量随生育期推移的变化趋势与形态指标变化相同,呈先增加后降低趋势。马铃薯块茎膨大期的根系分泌物总糖、总有机酸含量与单作相比分别显著增加了37.85%, 34.64% ( $p < 0.05$ )。 (3) 在单间作种植模式下,土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD 和 GMD 均随生育期的推移呈增加趋势 ( $p > 0.05$ ),  $D$  呈显著下降趋势 ( $p < 0.05$ )。除开花期的 MWD 外间作模式下的  $R_{0.25}$ , MWD 和 GMD 均显著高于单作 ( $p < 0.05$ ),  $D$  呈降低趋势,且间作显著低于单作 ( $p < 0.05$ )。 (4) 在开花期和块茎膨大期,马铃薯根系总根长、总根表面积、总根体积、分泌物总糖和总有机酸与土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD, GMD 均呈正相关,与  $D$  呈负相关,其中块茎膨大期大部分指标间的相关性达到显著 ( $p < 0.05$ ) 或极显著 ( $p < 0.01$ ) 水平。在成熟期时,马铃薯根系分泌物与土壤团聚体稳定性指标所呈相关关系与前两个时期相同,而根系形态特征与土壤团聚体稳定性指标所呈相关关系与前两个时期相反。综上,间作条件下马铃薯改善土壤结构稳定性的效果优于单作马铃薯。

**关键词:**坡耕地红壤; 根系形态特征; 根系分泌物; 土壤团聚体

中图分类号: S157.4<sup>+</sup>31; S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0067-07

## Effects of Intercropping on the Potato Roots and Soil Structure Stability in Slopping Land of Red Soil Region

LU Mei<sup>1</sup>, WANG Ting<sup>2</sup>, FAN Maopan<sup>1</sup>, ZHAO Jixia<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming, 650201, China; 2. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** In order to reveal the effect of intercropping on potato roots and structural stability of red soil in sloping farmland, the randomized block design was used in the field experiment, two treatments of potato monoculture and maize-potato intercropping were set to determine the soil aggregate stability index, root morphological characteristics and exudate contents at different growth stages of potato, and the effects of root morphology and exudates of potato on soil aggregate stability under different planting patterns were analyzed. The result showed that: (1) under the same planting pattern, the root morphological characteristics of potato system except root average diameter increased first and then decreased with the growth period; in potato flowering and tuber bulking period, the total root length, total root surface area and total root

收稿日期: 2022-01-11

修回日期: 2022-01-20

资助项目: 国家自然科学基金(41661063, 42007002); 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, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: aslumei@163.com

通信作者: 赵吉霞(1989—), 女, 云南大理人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: zhaojixia@163.com

<http://stbcy.paperonice.org>

volume of intercropping potato were higher than those of monoculture, and the total root length, total root surface area and total root volume of intercropping potato during tuber bulking increased by 24.41%, 24.75% and 35.03% ( $p < 0.05$ ), respectively, compared with those of monoculture; (2) the variation trend of total sugar and total organic acid content in root exudates of potato with the growth period was the same as that of morphological indexes, which increased first and then decreased; the contents of total sugar and total organic acid in root exudates of potato tuber bulking stage significantly increased by 37.85% and 34.64% ( $p < 0.05$ ) compared with those of monoculture; (3) soil aggregate stability index  $R_{0.25}$ , MWD and GMD showed an increasing trend with the passage of growth period under the monoculture and intercropping planting mode ( $p > 0.05$ ), and  $D$  showed a significant downward trend ( $p < 0.05$ ).  $R_{0.25}$ , MWD and GMD under intercropping mode were significantly higher than those under monoculture except for MWD at flowering period ( $p < 0.05$ );  $D$  showed a decreasing trend, and intercropping was significantly lower than monoculture ( $p < 0.05$ ); (4) at flowering period and tuber bulking period, the total root length, total root surface area, total root volume, total sugar in exudates and total organic acid of potato roots were positively correlated with soil aggregate stability indexes  $R_{0.25}$ , MWD and GMD, and negatively correlated with  $D$ ; the correlation among most indexes at tuber bulking period reached the significant ( $p < 0.05$ ) or extremely significant ( $p < 0.01$ ) level; at maturity period, the correlation between potato root exudates and soil aggregate stability index was the same as those in the previous two periods, while the correlation between root morphological characteristics and soil aggregate stability index was opposite to those in the previous two periods. To sum up, the effect of intercropping potato on improving soil structure stability is better than monoculture potato.

**Keywords:** slope farmland red soil; root morphological characteristics; root exudates; soil aggregate

红壤是云南省主要的土地类型之一,总面积为  $1.0655 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 约占全省面积的 28.5%<sup>[1]</sup>。由于区域降水分布不均匀及不合理的开发利用造成红壤坡耕地土壤和养分流失严重,致使区域生态环境恶化、土壤潜在生产力不能很好的发挥,最终导致农业经济发展受到限制<sup>[2]</sup>。

针对红壤坡耕地水土流失问题,已有学者提出了建设梯田、增施有机肥和改变作物种植方向等方法<sup>[3-4]</sup>。然而雨滴对土壤颗粒的剥离和径流运送的共同作用是造成水土流失的关键,因此增加土壤颗粒之间的黏结力是减少降雨对土壤侵蚀的根本<sup>[5]</sup>。土壤团聚体是颗粒发生聚合和排列后形成的,其抵御外界应力破碎作用保持原本结构的能力称为稳定性<sup>[6]</sup>。土壤团聚体稳定性是衡量土壤结构状况的重要指标,受生物和非生物因子的影响<sup>[6]</sup>。生物因子中的植物根系对土壤颗粒产生挤压和缠绕作用,非生物因子中的根系分泌物的胶结作用均可促进土壤团聚体的形成和稳定<sup>[7]</sup>。Oades<sup>[8]</sup>和魏朝富等<sup>[9]</sup>研究表明植物根系生长时分泌的多糖、有机酸物质以及形成的网络结构增加了土壤大团聚体的形成和稳定性。

间作是指在同一生长季内将两种或两种以上作物进行间隔种植的方法<sup>[10]</sup>。合适的作物间作能够促进其根系的生长,如在大麦/豌豆<sup>[11]</sup>、枣树/小麦<sup>[12]</sup>、

高粱/木豆<sup>[13]</sup>、蚕豆/玉米<sup>[14]</sup>、南瓜/油菜<sup>[15]</sup>间作体系均得以证实。研究表明,间作增加了马铃薯根系质量密度<sup>[16]</sup>、总干质量<sup>[17]</sup>、含水率和空间生态位的扩展<sup>[18]</sup>。但关于间作马铃薯根系对土壤团聚体稳定性的影响研究却鲜见报道。因此本研究以作物根系的研究为基础,选择云南典型种植模式:玉米间作马铃薯,通过在红壤坡耕地进行马铃薯单作和玉米马铃薯间作,研究单作和间作对马铃薯根系形态及分泌物的影响,明确作物根系形态特征及分泌物对土壤团聚体稳定性的影响,这对指导红壤坡耕地种植模式的选择提供理论科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况及作物品种

本试验的作物种植在云南省昆明市盘龙区松华坝水源保护区大摆社区进行(坐标为  $102^{\circ}78'5''\text{E}$ ,  $25^{\circ}27'8''\text{N}$ ),试验样地坡度为  $8^{\circ}$ ,海拔为 2 210 m,年平均气温为  $16^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量为 900~1 000 mm。试验所种植的玉米品种为“云瑞 88”,马铃薯品种为“云薯 801”。供试土壤为红壤,有机质含量为 39.55 g/kg,碱解氮含量为 105 mg/kg,速效磷含量为 26.83 mg/kg,速效钾含量为 217.9 mg/kg, pH 值为 5.20。

### 1.2 试验设计

试验小区采用随机区组设计,共设马铃薯单作、

玉米马铃薯间作 2 个处理,每个处理设置 3 个重复。每个小区的面积为  $40 \text{ m}^2$  ( $4 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ),共 6 个小区。

作物田间种植在 2018 年 4—10 月进行。单作马铃薯种植采用等行距种植,行距为  $60 \text{ cm}$ ,株距为  $30 \text{ cm}$ ,种植密度为  $55\,250 \text{ 株/hm}^2$ ;间作玉米马铃薯采用 2:2 种植模式,同种作物间行距为  $40 \text{ cm}$ ,不同作物间行距为  $50 \text{ cm}$ ,玉米株距为  $30 \text{ cm}$ ,种植密度为  $74\,286 \text{ 株/hm}^2$ ,马铃薯株距为  $35 \text{ cm}$ ,种植密度为  $67\,222 \text{ 株/hm}^2$ 。在作物生长期间视田间情况进行除草、灌水等田间管理。

施肥按当地施肥量进行,间作玉米施 N(尿素,含 N 46%): $315 \text{ kg/hm}^2$ , $\text{P}_2\text{O}_5$ (过磷酸钙,含  $\text{P}_2\text{O}_5$  16%): $120 \text{ kg/hm}^2$ , $\text{K}_2\text{O}$ (硫酸钾,含  $\text{K}_2\text{O}$  51%): $120 \text{ kg/hm}^2$ ,氮肥分为两次施入(基肥施 50%,50%在喇叭口期进行追肥),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: $150 \text{ kg/hm}^2$ , $\text{P}_2\text{O}_5$ : $150 \text{ kg/hm}^2$ , $\text{K}_2\text{O}$ : $225 \text{ kg/hm}^2$ ,全部作基肥施用。

### 1.3 样品采集

在马铃薯开花期、块茎膨大期和成熟期进行土壤样品和植株的采集。

植株采集方法:在单作马铃薯、间作马铃薯的各小区随机选取 3 株马铃薯,将整株马铃薯植株带至实验室以备后续根系分析试验。

土壤样品采集:以所选取的马铃薯植株为中心,收集面积为  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ ,0—20 cm 深的土壤,剔除杂物、根系后轻轻混匀土壤,再用四分法选取  $1 \text{ kg}$  土样装入塑料盒中带回实验室风干备用。

### 1.4 样品分析

1.4.1 根系分泌物测定 根系分泌物收集<sup>[19]</sup>:用水将马铃薯根系冲洗干净并用蒸馏水润洗。之后进行植株的培养(根系放入黑色塑料桶中以模拟土壤暗环境),运用补光灯照射 2 h,期间同时收集根系分泌物(用  $5 \text{ mg/L}$  百里酚浸泡 3 min 后,以  $0.005 \text{ mol/L}$   $\text{CaCl}_2$  为收集液)。将收集的根系分泌物置于  $40^\circ\text{C}$  环境下旋转蒸发至  $20 \text{ ml}$ ,用真空抽滤器过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜,收集并保存于  $-20^\circ\text{C}$  冰箱。

根系分泌物测定<sup>[19]</sup>:分泌物总糖含量采用蒽酮比色法测定,总有机酸含量采用 HPLC 法测定。高效液相色谱仪型号为 Agilent Technologies 1200 Infinity。试验所用色谱条件:Synergi 4u Hydro-RP 80A 色谱柱( $250 \text{ mm} \times 4.6 \text{ mm}$ ),流动相为  $10 \text{ mmol/L}$  磷酸二氢钾溶液(pH 值为 2.45),柱温  $35^\circ\text{C}$ ,流速  $1 \text{ ml/min}$ ,进样量  $10 \mu\text{l}$ ,检测波长  $214 \text{ nm}$ ,分析时间  $10 \text{ min}$ 。

1.4.2 根系形态特征分析 将根系置于扫描仪带水

的扫描盘中(仪器型号:Epson Perfection V700),并用镊子轻轻拨开须根,扫描成图片文件。用根系分析软件(WinRHIZO)分析根系的总根长、总根表面积、总根体积和根平均直径。

1.4.3 土壤团聚体分析 土壤机械稳定性团聚体的分级采用干筛法<sup>[20]</sup>。称取  $500 \text{ g}$  过  $5 \text{ mm}$  筛的风干土置于套筛的最上层(从上到下的孔径依次为  $2, 1, 0.5, 0.25, 0.106 \text{ mm}$ )并安装底盒和筛盖,振荡  $5 \text{ min}$ (频率  $150 \text{ 次/min}$ ,左右振幅  $10 \text{ cm}$ )。收集各筛中土壤团聚体并称量,计算各粒级土壤团聚体质量百分含量,用于湿筛。

土壤水稳定性团聚体的分级采用湿筛法<sup>[20]</sup>。按照干筛后各粒径土壤团聚体的百分含量将干筛团聚体样品配成  $50 \text{ g}$  土样,采用团聚体分析仪(型号:Daiki DIK-2012)测定。将土样置于孔径依次为  $2, 1, 0.5, 0.25, 0.106 \text{ mm}$  的最上层套筛,保证水淹没  $2 \text{ mm}$  筛底部,振动  $10 \text{ min}$ (频率  $30 \text{ 次/min}$ ,上下振幅  $3 \text{ cm}$ ),筛分结束后用水将各粒径水稳定性团聚体冲入铝盒中, $105^\circ\text{C}$  烘干后称重并计算其质量百分含量。通过公式计算得到团聚体平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数( $D$ )、 $>0.25 \text{ mm}$  水稳性团聚体含量( $R_{0.25}$ )。

### 1.5 数据处理

土壤团聚体稳定性指标:土壤团聚体的  $>0.25 \text{ mm}$  水稳性团聚体含量( $R_{0.25}$ )、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数( $D$ )分别按照王婷等<sup>[21]</sup>文中的方法计算。

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \quad (1)$$

式中: $R_{0.25}$  为粒径  $>0.25 \text{ mm}$  水稳性团聚体含量(%); $M_{r>0.25}$  为粒径  $>0.25 \text{ mm}$  水稳性团聚体质量(g); $M_T$  为水稳性团聚体总质量(g)。

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i \quad (2)$$

式中: $\bar{X}_i$  为各粒级水稳性团聚体平均直径(mm); $W_i$  为各粒级水稳性团聚体质量百分数(%)。

$$\text{GMD} = \exp\left[\left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln \bar{x}_i\right) / \left(\sum_{i=1}^n w_i\right)\right] \quad (3)$$

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

$$\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} \quad (4)$$

式中: $\bar{R}_i$  为某级水稳性团聚体平均直径(mm); $R_{\max}$  为水稳性团聚体最大粒径(mm); $M(r < \bar{R}_i)$  为粒径小于  $\bar{R}_i$  的水稳性团聚体质量(g); $M_T$  为水稳性团聚体总质量(g)。



### 1.6 数据分析

试验数据使用 Microsoft Excel 2019 软件进行统计处理。运用 SPSS 25.0 软件进行单因素 ANOVA 分析同一生育期不同种植模式以及同一种植不同生育期处理间的差异显著性。运用 Origin 2018 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植模式对马铃薯根系形态特征的影响

在同一种植模式下,随着马铃薯生育期的推移,其根系总根长、总根表面积、总根体积呈先增加后降

低趋势,且在块茎膨大期时高于开花期和成熟期,成熟期时最低,根平均直径呈持续增加趋势,且成熟期时显著高于开花期和块茎膨大期( $p<0.05$ )。开花期间作马铃薯根系的总根长、总根表面积、根平均直径、总根体积较单作均有一定程度的增加,但差异不显著( $p>0.05$ ),增幅为 5.19%~47.53%,块茎膨大期间作总根长、总根表面积、总根体积较单作分别显著增加了 24.41%,24.75%,35.03%( $p<0.05$ ),而根平均直径则有一定程度的降低( $p>0.05$ ),成熟期总根长、总根表面积、总根体积和根平均直径与单作相比呈下降趋势,但未达显著水平( $p>0.05$ )(表 1)。

表 1 不同种植模式下马铃薯各生育期根系形态特征变化

生育期	种植模式	根系形态特征			
		总根长/m	总根表面积/cm <sup>2</sup>	根平均直径/mm	总根体积/cm <sup>3</sup>
开花期	单作	3.38±0.7471Ba	816.60±181.2044Ba	0.77±0.0145Ba	15.82±3.4853Aa
	间作	4.56±0.5994Ba	1141.68±79.8698Ba	0.81±0.0636Ba	23.34±1.2824Aa
块茎膨大期	单作	5.49±0.1058Ab	1284.74±81.2374Ab	1.02±0.0693Ba	20.47±3.0537Ab
	间作	6.83±0.1266Aa	1602.66±70.5820Aa	0.94±0.0361Ba	27.64±1.2135Aa
成熟期	单作	0.42±0.0745Ca	40.99±11.2191Ca	2.78±0.2048Aa	10.63±1.2153Aa
	间作	0.36±0.0153Ca	32.02±2.5365Ca	2.32±0.3460Aa	9.13±0.3246Ba

注:表中数据为平均值±标准误;同列不同小写字母代表同一生育期不同种植模式间差异显著( $p<0.05$ );同列不同大写字母代表同一种植模式下不同生育期间的差异显著( $p<0.05$ )。下表同。

### 2.2 不同种植模式对马铃薯根系分泌物含量的影响

随着马铃薯生育期的推移,根系分泌物总糖和总有机酸含量均呈先升高后下降的趋势,两种种植模式下块茎膨大期的总糖、总有机酸含量较开花期和成熟期均有显著增加( $p<0.05$ )。各生育期间作模式下的马铃薯根系分泌物含量较单作均有增加,其中在开花期、块茎膨大期和成熟期,间作马铃薯的根系分泌物总糖含量分别较单作马铃薯增加了 42.65%,37.85%,18.97%,总有机酸含量分别较单作马铃薯增加了 22.01%,34.64%,112.3%,其差异性在块茎膨大期均达显著水平( $p<0.05$ ),而成熟期两种种植模式的根系分泌物含量差异不显著( $p>0.05$ )(表 2)。

表 2 不同种植模式下马铃薯各生育期根系分泌物含量变化  
mg/株

生育期	种植模式	根系分泌物	
		总糖含量	总有机酸含量
开花期	单作	2.04±0.2008Bb	11.50±0.7463Ba
	间作	2.91±0.0851Ba	14.03±0.4724Ba
块茎膨大期	单作	3.17±0.1201Ab	18.96±0.9607Ab
	间作	4.37±0.1054Aa	25.52±2.7544Aa
成熟期	单作	0.19±0.0371Ca	0.22±0.1917Ca
	间作	0.23±0.0265Ca	0.46±0.1217Ca

### 2.3 不同种植模式对土壤团聚体稳定性的影响

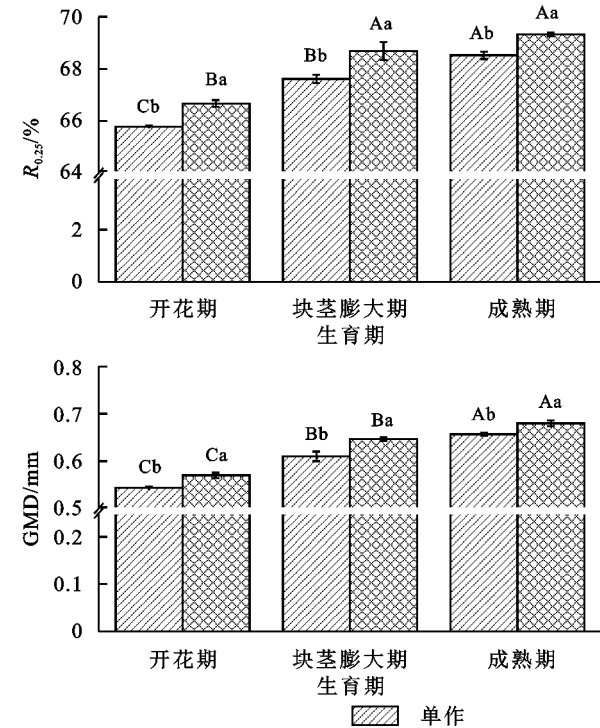
从整体趋势看,随着马铃薯生育期的推移,其土

壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD, GMD 逐渐增加,而  $D$  呈相反趋势,成熟期的  $R_{0.25}$ , MWD 和 MWD 较开花期、块茎膨大期分别明显增加,增幅分别为 0.93%~4.18%,3.47%~12.58%,4.62%~22.22%, $D$  的减幅为 1.17%~3.05%( $p<0.05$ )。除开花期的 MWD 外间作马铃薯的土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD 和 MWD 相比单作均显著增加( $p<0.05$ ), $D$  均显著下降( $p<0.05$ ),其中在开花期、块茎膨大期和成熟期,间作马铃薯的  $R_{0.25}$  较单作分别增加了 1.37%,1.59%,1.18%,MWD 分别增加了 3.56%,1.35%,2.61%,GMD 分别增加了 4.91%,6.01%,3.55%, $D$  分别降低了 0.49%,1.21%,0.87%(图 1)。说明间作马铃薯较单作显著改良了土壤团聚体稳定性。

### 2.4 根系分泌物、形态特征与土壤团聚体稳定性相关分析

马铃薯的根系分泌物总糖、总有机酸含量在各生育期与土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD, GMD 呈正相关关系,与  $D$  呈负相关关系,其中在开花期和块茎膨大期时大部分指标之间达显著( $p<0.05$ )或极显著水平( $p<0.01$ )(表 3)。马铃薯根系的总根长、总根表面积、总根体积在开花期与块茎膨大期与土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD, GMD 呈正相关关系,与  $D$  呈负相关关系,在成熟期时呈相反关系,且在块茎膨大期时相关水

平较高( $p<0.05$  或  $p<0.01$ );根平均直径与土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD, GMD 和  $D$  的相关关



注:图中不同小写字母代表同一生育期不同种植模式间土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD, GMD,  $D$  差异显著 ( $p<0.05$ );不同大写字母代表同一种植模式下不同生育期间的差异显著 ( $p<0.05$ )。

图 1 不同种植模式下马铃薯各生育期土壤团聚体稳定性的变化

表 3 马铃薯各生育期根系分泌物与土壤团聚体稳定性指标的相关性

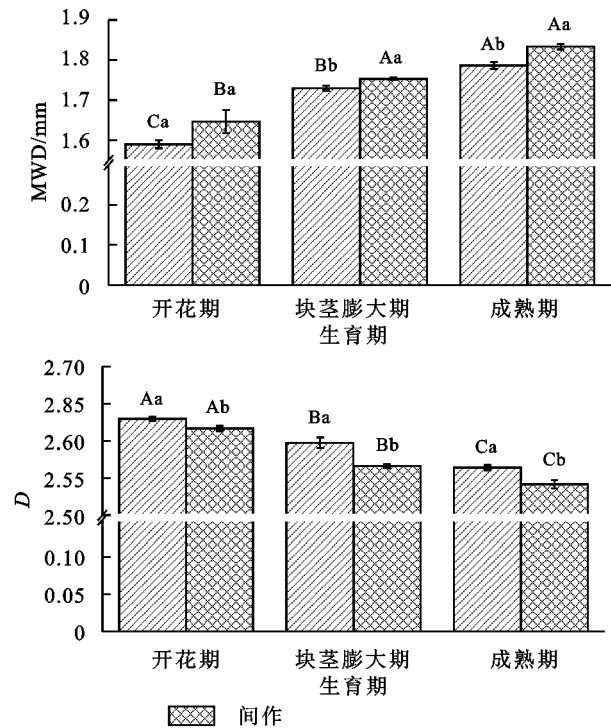
生育期	根系分泌物	$R_{0.25}$	MWD	GMD	$D$
开花期	总糖含量	0.906*	0.759	0.941**	-0.677
	总有机酸含量	0.779	0.833*	0.888*	-0.454
块茎膨大期	总糖含量	0.886*	0.856*	0.919**	-0.915*
	总有机酸含量	0.968**	0.821*	0.869*	-0.771
成熟期	总糖含量	0.042	0.145	0.13	-0.358
	总有机酸含量	0.187	0.368	0.303	-0.388

注: \* 表示相关性水平显著 ( $p<0.05$ ); \*\* 表示相关性水平极显著 ( $p<0.01$ )。下表同。

表 4 马铃薯各生育期根系形态特征与土壤团聚体稳定性指标的相关性

生育期	根系形态特征	$R_{0.25}$	MWD	GMD	$D$
开花期	总根长	0.549	0.221	0.434	-0.294
	总根表面积	0.625	0.369	0.527	-0.339
	根平均直径	0.196	0.474	0.257	-0.117
	总根体积	0.671	0.528	0.608	-0.365
	总根长	0.880*	0.877*	0.913**	-0.910*
块茎膨大期	总根表面积	0.940**	0.846*	0.973**	-0.916*
	根平均直径	-0.363	-0.741	-0.693	0.858*
	总根体积	0.908*	0.750	0.988**	-0.938**
	总根长	-0.168	-0.502	-0.480	0.554
	总根表面积	-0.090	-0.409	-0.396	0.480
成熟期	根平均直径	-0.729	-0.590	-0.456	0.548
	总根体积	-0.406	-0.497	-0.634	0.584

系在开花期时与其他两个时期呈相反关系,大部分指标间的差异性均不显著( $p>0.05$ )(表 4)。



### 3 讨论

#### 3.1 马铃薯根系形态特征和分泌物含量的变化

马铃薯各生育期的根系生长状况及分泌糖类和有机酸类含量不同<sup>[22]</sup>。本研究表明:随着生育期的推移,马铃薯根系分泌物含量及除根平均直径外的形态特征指标均呈先增加后降低趋势,在块茎膨大期时最大。这可能是由于马铃薯在开花期到块茎增长期时将地上部合成的养分不断向地下部输送,使其根系进一步生长,到成熟期时根系开始腐烂,生长代谢下降,致使根系形态特征和分泌物含量下降<sup>[22-23]</sup>。根平均直径随生育期呈上升趋势,且各时期差异性均未达到显著水平,可能是因为根系的腐烂对直径的平均值影响较小<sup>[24]</sup>。

本研究发现随着生育期的推移,不同种植模式下马铃薯根系分泌物均呈先增加后降低趋势,这与 Aulakh 等<sup>[25]</sup>对水稻各生育期根系分泌物变化研究结果一致。在开花期、块茎膨大期间作马铃薯的总根长、总根表面积、总根体积及各生育期间作马铃薯根系分泌物含量均高于单作。这可能是由于玉米根系分泌物促进马铃薯地下根系的生长,而在单作下相邻马铃薯根系分泌物限制彼此根系生长<sup>[26]</sup>。间作模式下作物根系会分泌物化感物质影响邻近作物的生

长<sup>[27]</sup>。作物根系分泌的化感物质有氨基酸、有机酸、糖类、次生代谢产物,它们对相邻作物产生的化感作用类型取决于作物类型<sup>[28]</sup>。已有研究表明合理的间作类型可增加作物根系生长<sup>[29]</sup>。王婷等<sup>[21]</sup>结果表明间作玉米根系分泌的总糖、总有机酸含量高于单作,本研究结果与其一致。

### 3.2 土壤团聚体稳定性的变化

土壤团聚体的稳定性受植物根系及其分泌物的影响,可运用  $R_{0.25}$ , MWD, GMD 和  $D$  进行评价,当  $R_{0.25}$ , MWD 和 GMD 越高,  $D$  越低时,则表示土壤结构越稳定<sup>[6,30]</sup>。本研究表明:土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD, GMD 随着马铃薯的生育期的推移呈增加趋势,  $D$  呈下降趋势。这可能是由于马铃薯根系生长过程中降低根际土水分、对土壤颗粒的压缩和缠绕作用及其分泌糖类和有机酸类物质的胶结作用促进了团聚体的稳定<sup>[6-7]</sup>。到成熟期时虽然马铃薯根系形态特征和分泌物含量下降,但成熟期前分泌到土壤中的糖类和有机酸类物质稳定性有数周或数月,任可胶结土壤颗粒,加上马铃薯地上枯茎覆盖作用土壤团聚体稳定性增加<sup>[31-32]</sup>。程伟威等<sup>[33]</sup>研究玉米马铃薯间作时土壤团聚体稳定性的变化,结果表明随玉米生育期的推移,土壤团聚体稳定性随之增加,本研究结果与其一致。

物种多样性和丰富度增加可促进土壤团聚体稳定<sup>[34]</sup>。本试验得出:在间作模式下土壤团聚体稳定性指标除  $D$  显著低于单作外其余指标均高于单作。这可能是由于间作不仅促进了马铃薯根系生长,还促进了根系分泌大量真菌利用的碳源,促使其根际真菌群落丰富度和多样性增加<sup>[35]</sup>,真菌根外菌丝的网络结构包被作用、疏水作用及其壁上的糖类和糖蛋白类物质的胶结作用增加团聚体稳定性<sup>[36-37]</sup>。本研究结果与向蕊等<sup>[38]</sup>研究间作对团聚体稳定性影响结果一致。

### 3.3 马铃薯根系与土壤团聚体稳定性指标的相关性

在马铃薯各生育期其根系分泌物与土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD, GMD 呈正相关关系,而与  $D$  呈负相关关系,差异性在块茎膨大期最大,这与李杨等<sup>[39]</sup>对根系分泌物与团聚体稳定性关系的研究结果一致。说明根系分泌的总糖和总有机酸含量显著影响土壤团聚体的稳定性。除根平均直径外的根系形态特征指标在开花期和块茎膨大期与土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD, GMD 呈正相关关系,而与  $D$  呈负相关关系,在成熟期时呈相反关系。根系平均直径在开花期与土壤团聚体稳定性指标所呈关系与块茎膨大期和成熟期相反,这可能是当作物根系直径  $>1$  mm 时会对土壤团聚体产生破坏作用<sup>[40]</sup>。说明马铃薯根系

总根长、总根表面积和总根体积对土壤团聚体稳定性的提升作用在开花期和块茎膨大期时较强。

## 4 结论

(1) 在不同的种植模式下,马铃薯根系总根长、总根表面积和总根体积均随生育期的推移呈先增加后降低的趋势,在块茎膨大期最高。在开花期和块茎膨大期,间作马铃薯根系总根长、总根表面积和总根体积与单作相比均较高,在块茎膨大期差异性达显著水平( $p < 0.05$ )。

(2) 马铃薯根系分泌物总糖和总有机酸含量随生育期推移的变化趋势与根系形态指标变化一致,且间作模式下的值均高于单作。

(3) 在同一种植模式下,土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD 和 GMD 均随生育期的推移呈增加趋势( $p > 0.05$ ),  $D$  呈显著下降趋势( $p < 0.05$ ),且在间作模式下除  $D$  显著低于单作外( $p < 0.05$ ),其余指标均高于单作。

(4) 在前两个生育期,马铃薯根系总糖、总有机酸、总根长、总根表面积、总根体积与土壤团聚体稳定性指标  $R_{0.25}$ , MWD, GMD 均呈正相关,与  $D$  呈负相关,其中在块茎膨大期大部分指标间达到显著( $p < 0.05$ )或极显著( $p < 0.01$ )水平。

(5) 间作条件下马铃薯改善土壤结构稳定性的效果优于单作马铃薯。

### 参考文献:

- [1] 汪家鎔,刘增芝,于南子.云南的红壤[J].云南林业调查规划,1991,16(2):10-17.
- [2] 刘建香,贾秋鸿,田树,等.不同农艺措施对云南红壤坡耕地钾素平衡和流失的影响[J].西南农业学报,2009,22(4):1006-1010.
- [3] 王帅兵,宋娅丽,王克勤,等.不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J].农业工程学报,2018,34(13):160-169.
- [4] 范亚琳,刘贤赵,高磊,等.不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J].土壤学报,2019,56(3):638-649.
- [5] Zhang G S, Chan K Y, Oates A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2007,92(1/2):122-128.
- [6] 张旭冉,张卫青.土壤团聚体研究进展[J].北方园艺,2020,44(21):131-137.
- [7] Hu F, Xu C, Li H, et al. Particles interaction forces and their effects on soil aggregates breakdown[J]. Soil and Tillage Research, 2015,147:1-9.
- [8] Oades J M. Soil organic matter and structural stability:



- mechanisms and implications for management[J]. *Plant and Soil*, 1984,76(1):319-337.
- [9] 魏朝富,高明,谢德体,等.有机肥对紫色水稻水土稳性团聚体的影响[J].*土壤通报*,1995,26(3):114-116.
- [10] Willey R W. Resource use in intercropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 1990,17(1/3):215-231.
- [11] Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops: a field study employing  $^{32}\text{P}$  technique[J]. *Plant and Soil*, 2001,236(1):63-74.
- [12] Wang B J, Zhang W, Ahanbieke P, et al. Interspecific interactions alter root length density, root diameter and specific root length in jujube/wheat agroforestry systems [J]. *Agroforestry Systems*, 2014,88(5):835-850.
- [13] Natarajan M, Willey R W. Sorghum-pigeonpea intercropping and the effects of plant population density: 1. Growth and yield [J]. *the Journal of Agricultural Science*, 1980,95(1):51-58.
- [14] Li L, Sun J, Zhang F, et al. Root distribution and interactions between intercropped species [J]. *Oecologia*, 2006,147(2):280-290.
- [15] 孙国庆,张俊花,王登燕,等.南瓜油葵间作耕作层根系分布与植株产量[J].*生态学杂志*,2021,40(10):3147-3158.
- [16] 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:自然科学版*, 2018,33(2):363-370.
- [17] 李萍,刘玉皎.高海拔地区蚕豆/马铃薯根系时空分布特征及根系活性研究[J].*宁夏大学学报:自然科学版*, 2013,34(4):338-343.
- [18] 李萍.蚕豆/马铃薯最优间作模式探讨及间作群体根系时空分布特征研究[D].西宁:青海大学,2013.
- [19] 王婷,王强学,李永梅,等.玉米大豆间作对作物根系及土壤团聚体稳定性的影响[J].*云南农业大学学报:自然科学版*,2021,36(3):507-515.
- [20] 周晓晨,李永梅,王自林,等.坡耕地红壤农作物根系与团聚体稳定性的关系[J].*山西农业大学学报:自然科学版*,2017,37(11):818-824.
- [21] 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.
- [22] 张文明,邱慧珍,张春红,等.马铃薯根系分泌物成分鉴别及其对立枯丝核菌的影响[J].*应用生态学报*,2015,26(3):859-866.
- [23] 解建侠.土豆及其根系生长的模拟研究[D].昆明:昆明理工大学,2009.
- [24] 蒋纪芸.作物栽培学[M].北京:世界图书出版公司,1995.
- [25] Aulakh M S, Wassmann R, Bueno C, et al. Characterization of root exudates at different growth stages of ten rice (*Oryza sativa* L.) cultivars [J]. *Plant Biology*, 2001,3(2):139-148.
- [26] 字淑慧,吴开贤,欧阳铖,等.玉米和马铃薯根系分泌物对马铃薯生长的影响[J].*干旱地区农业研究*,2019,37(2):88-94.
- [27] Jarchow M E, Cook B J. Allelopathy as a mechanism for the invasion of *Typha angustifolia* [J]. *Plant Ecology*, 2009,204(1):113-124.
- [28] Bais H P, Weir T L, Perry L G, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms[J]. *Annu. Rev. Plant Biol.*,2006,57:233-266.
- [29] 陶晶,邬奇峰,石江,等.间作与接种丛枝菌根真菌对新垦山地玉米产量和土壤肥力的影响[J].*浙江农业学报*,2020,32(1):115-123.
- [30] Eisenhauer N, Lanoue A, Strecker T, et al. Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass[J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1):1-8.
- [31] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].*水土保持学报*,2003,17(3):34-37,117.
- [32] 徐香茹,汪景宽.土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J].*土壤通报*,2017,48(6):1523-1529.
- [33] 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.
- [34] Pérès G, Cluzeau D, Menasseri S, et al. Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient[J]. *Plant and Soil*, 2013,373(1):285-299.
- [35] 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.
- [36] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982,33(2):141-163.
- [37] Rillig M C, Mardatin N F, Leifheit E F, et al. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi increases soil water repellency and is sufficient to maintain water-stable soil aggregates [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010,42(7):1189-1191.
- [38] 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.
- [39] 李杨,仲波,陈冬明,等.不同浓度和多样性的根系分泌物对土壤团聚体稳定性的影响[J].*应用与环境生物学报*,2019,25(5):1061-1067.
- [40] 吴彦,刘世全,付秀琴,等.植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J].*土壤侵蚀与水土保持学报*,1997,11(1):46-50.