

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202003060

玉米大豆间作对作物根系及土壤团聚体稳定性的影响*

王 婷^{1#}, 王强学^{2#}, 李永梅¹, 王自林¹, 肖靖秀¹, 范茂攀^{1**}

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201;

2. 云南武定县插甸镇农业农村服务中心, 云南 武定 651606)

摘要:【目的】揭示红壤坡耕地不同种植模式下玉米、大豆根系形态及根系分泌物对土壤水稳性团聚体稳定性的影响。【方法】采用田间小区试验, 设置玉米单作、大豆单作和玉米大豆间作 3 种植模式, 测定玉米和大豆不同生育期根系形态参数、根系分泌物分泌量和土壤团聚体稳定性, 分析不同种植模式下, 作物根系形态和根系分泌物对土壤团聚体稳定性的影响。【结果】在玉米抽雄期, 与单作相比, 间作玉米的根干质量、总根长、总根表面积、根系分泌总糖和总有机酸含量显著增加 ($P<0.05$), 增幅分别为 15.17%、58.49%、45.67%、34.30% 和 15.67%; >0.25 mm 团聚体百分含量 ($R_{0.25}$)、平均质量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 分别显著提高了 2.64%、3.37% 和 6.06% ($P<0.05$), 土壤分形维数 (D) 显著降低了 0.82% ($P<0.05$)。在大豆结荚期, 与单作相比, 间作大豆的根干质量、总根长、总根表面积、总根体积、根系分泌总糖和总有机酸含量显著增加 ($P<0.05$), 增幅分别为 17.25%、63.91%、54.32%、42.77%、37.21% 和 28.16%; $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 分别显著提高了 1.54%、2.99% 和 6.78% ($P<0.05$), D 显著降低了 0.73% ($P<0.05$)。作物根系根干质量、总根长、总根表面积、总根体积、根系分泌总糖含量、根系分泌总有机酸含量与 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与 D 呈极显著负相关关系 ($P<0.01$)。【结论】玉米大豆间作能够改善作物的根系形态和提高作物根系分泌物分泌量, 进而提高土壤团聚体稳定性, 对红壤坡耕地具有肥力提升和减少水土流失的有益效应。

关键词: 玉米大豆间作; 根系形态; 根系分泌物; 坡耕地红壤; 水稳性团聚体

中图分类号: S 157.431

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 03-0507-09

Effect of Maize and Soybean Intercropping on Root System and Soil Aggregate Stability

WANG Ting¹, WANG Qiangxue², LI Yongmei¹, WANG Zilin¹, XIAO Jingxiu¹, FAN Maopan¹

(1. College of Resource and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Agricultural and Rural Service Center of Chadian Town, Wuding 651606, China)

Abstract: [Purpose] To reveal the effects of root morphology and root exudates of maize and soybean on the stability of soil water stable aggregates under different planting patterns in red soil sloping land. [Methods] Field plot experiment was used to set up three planting patterns: maize monoculture, soybean monoculture and maize-soybean intercropping. The root morphological parameters,

收稿日期: 2020-03-26

修回日期: 2021-02-23

网络首发时间: 2021-05-20 16:51:07

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (41661063, 41461059); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2018Y063)。

作者简介: #对本文文献等同, 为并列第一作者。王婷 (1993—), 女, 山西太原人, 在读硕士研究生, 主要从事坡耕地水土保持研究。E-mail: 342755782@qq.com; 王强学 (1977—), 男, 云南武定人, 学士, 农艺师, 主要从事农业技术推广应用。E-mail: 342755782@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 范茂攀 (1977—), 男, 云南宣威人, 博士, 副教授, 主要从事坡耕地水土保持与持续利用研究。E-mail: mpfan@126.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20210520.1406.003.html>



secretion of root exudates and stability of soil aggregates were measured at different growth periods of maize and soybean. The effects of crop root morphology and exudates on stability of soil aggregates were analyzed under different planting patterns. [**Results**] At the tasseling period, root dry weight, root length, root surface area, total sugar and total organic acid contents of intercropping maize were significantly increased compared with that of monoculture maize ($P<0.05$), with the increase rates of 15.17%, 58.49%, 45.67%, 34.30% and 15.67%, respectively; percentage content of aggregate greater than 0.25 mm ($R_{0.25}$), mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) were significantly increased by 2.64%, 3.37% and 6.06% ($P<0.05$), respectively; and the fractal dimension (D) of soil decreased significantly by 0.82% ($P<0.05$). At the podding period, root dry weight, total root length, root surface area, root volume, total sugar and total organic acid contents of intercropping soybean were significantly increased compared with that of monoculture soybean, with the increase rates of 17.25%, 63.91%, 54.32%, 42.77%, 37.21% and 28.16%, respectively; and $R_{0.25}$, MWD and GMD were significantly increased by 1.54%, 2.99% and 6.78% ($P<0.05$), respectively; and D of soil significantly decreased by 0.73% ($P<0.05$). Root dry weight, root length, root surface area, root volume, total sugar and total organic acid were significantly positively correlated with $R_{0.25}$ ($P<0.01$), MWD and GMD, and significantly negatively correlated with D ($P<0.01$). [**Conclusion**] Maize-soybean intercropping can improve the root morphology of crops, increase the secretion of root exudates of crops, and then improve the stability of soil aggregates, which has beneficial effects on improving fertility and reducing soil erosion of red soil sloping land.

Keywords: maize-soybean intercropping; root morphology; root exudates; sloping farmland red soil; water stable aggregates

间作是在同一时间同一地块内分行或分带相间种植 2 种或 2 种以上作物的种植方式^[1]。由于豆科作物具有固氮作用, 其间作种植模式被大量用于农业生产实践^[2-4], 且间作豆科相比单作能提高作物产量, 表现为土地当量比大于 1^[5-6]。禾本科与豆科间作具有众多间作优势效应, 包括固氮和氮素高效利用、光热资源和土壤水分的高效利用, 种植系统中杂草和病虫害控制, 土壤稳定性和渗透性的提高, 土壤微生物量和微生物多样性的增加, 土壤可利用氮磷养分的增加等^[7-8]。相比各自单作, 玉米大豆间作不仅能够改变作物根系构型, 促进其根系生长^[5], 也能促进根际根系分泌过程^[9]。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 在土壤生态系统中发挥着重要作用。土壤团聚体能够降低土壤和养分流失, 保证植物正常生长和土壤微生物活动, 也能提高土壤碳固持能力^[10]。土壤团聚过程由土粒团聚形成小团聚体, 再由小团聚体团聚形成大团聚体, 团聚力受到物理、化学、生物因素的影响。细根和真菌菌丝通过缠绕作用使

得土壤微团聚体固结形成大团聚体^[11], 根系和土壤微生物分泌多糖胶结土粒形成和稳定微团聚体已被大量研究所证实^[12]。此外, 根系分泌多糖可作为微生物的碳源物质供土壤微生物利用, 根系分泌有机酸可以改善土壤微生物区系, 增加土壤细菌生物量^[13], 从而间接改善土壤团聚体状况。评价土壤团聚状况的指标有: >0.25 mm 团聚体百分含量 ($R_{0.25}$)、平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD)、分型维数 (D), $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 值越大, D 值越小, 土壤结构性越好。

红壤是中国的主要土壤类型之一, 广泛分布于热带和亚热带地区, 占国土总面积的 23%, 且红壤分布区水热资源丰富, 是国家重要粮食产地^[14]。但由于红壤分布区降雨集中、地形起伏, 加之不合理的农田管理措施, 红壤坡耕地土壤养分流失严重, 威胁区域生态健康和粮食安全。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元对降低土壤流失和改善土壤养分具有重要影响^[15]。国内外对红壤坡耕地团聚体结构改善的研究多集中于对土地利用方式、耕作强度和施肥方式等所做的

改变^[16-17]。本研究基于典型红壤坡耕地田间小区试验,探究单间作物种植模式下根系形态和根系分泌物(糖类和有机酸类)影响团聚体稳定性的机理,为红壤坡耕地地区土壤保育提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于云南省昆明市盘龙区松华坝水源保护区大摆社区,中心地理坐标为N25°15'58",E102°46'39",坡度为8°,海拔2 210 m,年平均气温16℃,年降雨量900~1 000 mm,属亚热带季风气候。供试土壤有机质含量39.55 g/kg,碱解氮含量105 mg/kg,速效磷含量26.83 mg/kg,速效钾含量217.9 mg/kg, pH 5.20。

1.2 试验设计

试验时间为2018年4—10月,采取随机区组设计,共设置3个处理,分别为玉米单作、大豆单作和玉米大豆间作。小区面积为4 m×10 m,每个处理设置3个重复,共9个小区。玉米单作采用宽窄行种植,宽行80 cm,窄行40 cm,株距25 cm,小区共计17行,每行16株;大豆单作采用等行距种植,行距60 cm,株距25 cm,共计17行,每行16株;玉米大豆间作采用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,小区共计玉米12行,每行13株,大豆11行,每行13株。作物品种玉米为云瑞88,大豆为滇豆7号。作物施肥按当地常规进行,玉米施N 315 kg/hm², P₂O₅ 120 kg/hm², K₂O 120 kg/hm²,其中氮肥分2次(50%做基肥,50%做追肥),追肥在喇叭口期进行,磷肥和钾肥全部作基肥施用;大豆施N 120 kg/hm², P₂O₅ 240 kg/hm², K₂O 180 kg/hm²,全部作基肥施用。所用氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 16%),钾肥为硫酸钾(含K₂O 51%)。

1.3 样品采集

在玉米喇叭口期(大豆分枝期)、抽雄期(结荚期)和完熟期采集植株和土壤样品。植株采样方法为:单作小区随机选取3株作物,间作小区随机选取各3株长势居中的作物,以植株为中心,将带有土体的植株整株挖起带回实验室。土壤采样方法为:单作小区随机选取3株长势居中

的作物,间作小区随机选取各3株长势居中的作物,将植株的地上部斩断,以植株为中心,收集30 cm×30 cm、0~20 cm耕层土体,剔除杂物和根系后混匀土壤,用四分法选取1 kg带回实验室,沿土壤自然缝隙把大土块轻轻掰成粒径<10 mm小土块后风干备用。

1.4 样品分析

1.4.1 根系分泌物收集及分析

用自来水冲洗使植株根系完整露出后再用蒸馏水冲洗3次,然后把植株放入黑色圆桶中(模拟根系生长在土壤中的暗环境),在补光灯照射下收集根系分泌物2 h(5 mg/L百里酚浸泡3 min后,以0.005 mol/L CaCl₂为收集液)。根系分泌物收集液在40℃条件下旋转蒸发浓缩至20 mL,用真空抽滤器过0.45 μm滤膜,装入20 mL冻存管,-20℃冰箱保存。根系分泌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,仪器型号为Agilent Technologies 1200 Infinity高效液相色谱仪,试验所用色谱条件:Synergi 4u Hydro-RP 80A色谱柱(250 mm×4.6 mm),流动相为10 mmol/L磷酸二氢钾溶液(pH 2.45),柱温35℃,流速1 mL/min,进样量10 μL,检测波长214 nm,分析时间10 min。试验所用有机酸标样均购置于德国SIGMA公司。

1.4.2 根系分布分析

用Epson Perfection V700型扫描仪将收集完根系分泌物后的根系样品扫描成图片文件,然后用WinRHIZO根系分析软件得到总根长、总根表面积、根平均直径和总根体积。

1.4.3 土壤团聚体分析

土壤团聚体采用Elliott湿筛法测定。团聚体粒径从大到小分为6级,依次为>2 mm、>1~2 mm、>0.5~1 mm、>0.25~0.5 mm、>0.106~0.25 mm和≤0.106 mm。团聚体湿筛采用团聚体分析仪测定(仪器型号为:Daiki DIK-2012),具体操作为:称取100 g自然风干土样放置于团聚体套筛最上层,保证水没过2 mm筛底部,且振动时不没过其顶部,以30次/min运行速度上下震动15 min,振幅为3 cm,分析结束后将各粒级水稳性团聚体冲入铝盒中,105℃烘干后计算各粒级水稳性团聚体质量。

1.5 数据处理

>0.25 mm水稳性团聚体含量($R_{0.25}$):

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \tag{1}$$

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

平均质量直径 (MWD, mean weight diameter)^[13]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \tag{2}$$

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，%。

几何平均直径 (GMD, geometric mean diameter)^[13]:

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \tag{3}$$

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，%。

分形维数 (D , fractal dimension) 的计算采用杨培岭等^[14]推导的公式:

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

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 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。

对公式 (4) 等号两边取对数，得 $\lg \left[\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T} \right] = (3-D) \lg \left[\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right]$ ，分别以 $\lg [M(r < \bar{R}_i)/M_T]$ 为纵坐标， $\lg [\bar{R}_i/R_{\max}]$ 为横坐标作图， $3-D$ 即为此试验直线的斜率，从而求 D 值。

使用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理，用 SPSS 23.0 软件进行独立样本 T 检验和 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式对作物根系形态的影响

如表 1 所示：随着玉米生育期的推移，根干质量、总根长、总根表面积、根平均直径和总根体积逐渐增加，直至成熟期达到最大值。在喇叭口期，与单作相比，间作玉米的根干质量、总根长、总根表面积和总根体积分别增加 39.78%、39.88%、17.65% 和 9.38%；在抽雄期，与单作相比，间作玉米的根干质量、总根长和总根表面积分别显著增加 15.17%、58.49% 和 45.67%，根平均直径显著降低 13.89%；在成熟期，与单作相比，间作玉米的根干质量、总根长、总根表面积和总根体积分别显著增加 15.04%、38.45%、32.13% 和 49.85%，根平均直径显著降低 12.30%。

表 1 不同种植模式下各生育期玉米根系形态变化

Tab. 1 Changes in root morphology of maize at growth periods under different planting patterns

生育期 growth period	种植方式 planting pattern	根干质量/g root dry weight	总根长/m root length	总根表面积/ cm ² root surface area	根平均直径/ mm average root diameter	总根体积/ cm ³ root volume
喇叭口期 bell-mouthed period	单作 monoculture	4.55±0.60 b	3.26±0.14 b	795.44±84.74 a	0.74±0.05 a	17.70±0.95 a
	间作 intercropping	6.36±0.35 a	4.56±0.12 a	935.82±46.66 a	0.86±0.06 a	19.36±1.44 a
抽雄期 tasseling period	单作 monoculture	13.71±1.04 b	9.78±0.71 b	3 271.93±133.72 b	1.08±0.06 a	96.11±13.70 a
	间作 intercropping	15.79±0.33 a	15.50±1.07 a	4 766.15±750.17 a	0.93±0.02 b	115.27±5.20 a
成熟期 mature period	单作 monoculture	22.08±1.01 b	17.45±0.43 b	5 974.07±290.98 b	1.22±0.04 a	168.01±7.76 b
	间作 intercropping	25.40±0.75 a	24.16±0.60 a	7 893.27±141.64 a	1.07±0.04 b	251.77±15.01 a

注：不同小写字母代表各处理间差异显著 ($P<0.05$)；下同。
Note: Different lowercases mean significant difference ($P<0.05$); the same as below.

如表 2 所示：随着大豆生育期的推移，根干质量、总根长、总根表面积、根平均直径和总根体积逐渐增加，直至成熟期达到最大值。在分枝期，与单作相比，间作大豆的总根长、总根表面积和总根体积分别显著增加 40.91%、27.30% 和 19.09%；在结荚期，与单作相比，间作大豆的根

干质量、总根长、总根表面积和总根体积分别显著增加 17.25%、63.91%、54.32% 和 42.77%，根平均直径显著降低 8.79%；在成熟期，与单作相比，间作大豆的根干质量、总根长、总根表面积和总根体积分别显著增加 15.04%、31.66%、40.29% 和 19.60%。

2.2 不同种植模式对作物根系分泌物的影响

如表 3 所示: 随着玉米生育期的推移, 根系分泌总糖、根系分泌总有机酸不断提升, 直至抽雄期达到最大值而后在成熟期下降。在喇叭口期, 与单作相比, 间作玉米的根系分泌总糖和根系分泌总有机酸含量分别提高 10.60% 和 33.45%; 在抽雄期, 与单作相比, 间作玉米的根系分泌总糖和总有机酸含量分别显著增加 34.30% 和 15.67%; 在成熟期, 与单作相比, 间作玉米的根系分泌总糖和总有机酸含量分别显著增加 68.54% 和 15.02%。

如表 4 所示: 随着大豆生育期的推移, 根系分泌总糖、根系分泌总有机酸不断提升, 直至结荚期达到最大值而后在成熟期下降。在分枝期,

与单作相比, 间作大豆的根系分泌总糖和总有机酸含量分别显著提高 51.85% 和 53.98%; 在结荚期, 与单作相比, 间作大豆的根系分泌总糖和根系分泌总有机酸含量分别显著增加 37.21% 和 28.16%; 在成熟期, 与单作相比, 间作大豆的根系分泌总糖和总有机酸含量分别增加 32.35% 和 12.73%。

2.3 不同种植模式对土壤团聚体稳定性的影响

由图 1 所示: 随着玉米生育期的推移, 不同玉米种植模式下 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 均不断升高, D 不断降低。与单作相比, 玉米在喇叭口期、抽雄期和成熟期的 $R_{0.25}$ 分别显著提高 1.84%、2.64% 和 2.42%; MWD 分别显著提高 4.35%、3.37% 和 2.65%; GMD 分别显著提高

表 2 不同种植模式下各生育期大豆根系形态变化
Tab. 2 Changes in root morphology of soybean at growth periods under different planting patterns

生育期 growth period	种植方式 planting pattern	根干质量/g root dry weight	总根长/m root length	总根表面积/cm ² root surface area	根平均直径/mm average root diameter	总根体积/cm ³ root volume
分枝期 branching period	单作 monoculture	3.64±0.52 a	1.10±0.12 b	270.41±8.26 b	0.69±0.05 a	6.39±0.30 b
	间作 intercropping	4.58±0.44 a	1.55±0.12 a	344.24±19.18 a	0.68±0.13 a	7.61±0.68 a
结荚期 podding period	单作 monoculture	8.52±0.44 b	1.33±0.06 b	363.12±4.13 b	0.91±0.02 a	8.37±0.48 b
	间作 intercropping	9.99±0.03 a	2.18±0.14 a	560.36±34.45 a	0.83±0.03 b	11.95±0.75 a
成熟期 mature period	单作 monoculture	15.62±0.73 b	3.79±0.15 b	691.19±7.99 b	0.94±0.04 a	30.26±1.37 b
	间作 intercropping	17.97±0.03 a	4.99±0.26 a	969.66±86.84 a	0.86±0.03 a	36.19±1.55 a

表 3 不同种植模式下各生育期玉米根系分泌物变化
Tab. 3 Changes in root exudates of maize at growth periods under different planting patterns mg/株

生育期 growth period	种植方式 planting pattern	总糖含量 total sugar content	总有机酸含量 total organic acid content
喇叭口期 bell-mouthed period	单作 monoculture	2.17±0.16 a	11.57±1.56 b
	间作 intercropping	2.40±0.40 a	15.44±1.27 a
抽雄期 tasseling period	单作 monoculture	6.88±0.18 b	22.85±1.03 b
	间作 intercropping	9.24±1.26 a	26.43±2.01 a
成熟期 mature period	单作 monoculture	3.91±0.59 b	16.91±0.19 b
	间作 intercropping	6.59±0.43 a	19.45±0.90 a

表 4 不同种植模式下各生育期大豆根系分泌物变化
Tab. 4 Changes in root exudates of soybean at growth periods under different planting patterns mg/株

生育期 growth period	种植方式 planting pattern	总糖含量 total sugar content	总有机酸含量 total organic acid content
分枝期 branching period	单作 monoculture	0.54±0.04 b	1.13±0.01 b
	间作 intercropping	0.82±0.12 a	1.74±0.17 a
结荚期 podding period	单作 monoculture	1.29±0.07 b	6.57±0.73 b
	间作 intercropping	1.77±0.27 a	8.42±0.79 a
成熟期 mature period	单作 monoculture	1.02±0.11 a	4.32±1.52 a
	间作 intercropping	1.35±0.24 a	4.87±1.14 a

5.45%、6.06% 和 5.63%； D 分别降低 0.53%、0.82% 和 1.02%，并在抽雄期和成熟期达到显著性差异。

由图 2 所示：随着大豆生育期的推移，不同大豆种植模式下 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 均不断升高， D 不断降低。与单作相比，大豆在分枝期、结荚期和成熟期的 $R_{0.25}$ 分别显著提高 0.85%、1.54% 和 1.86%；MWD 分别提高 0.65%、2.99% 和 2.26%，并在结荚期和成熟期达到显著性差异；GMD 分别提高 1.16%、6.78% 和 6.35%，并在结荚期和成熟期达到显著性差异； D 分别降低 0.08%、0.73% 和 1.05%，并在结荚期和成熟期达到显著性差异。

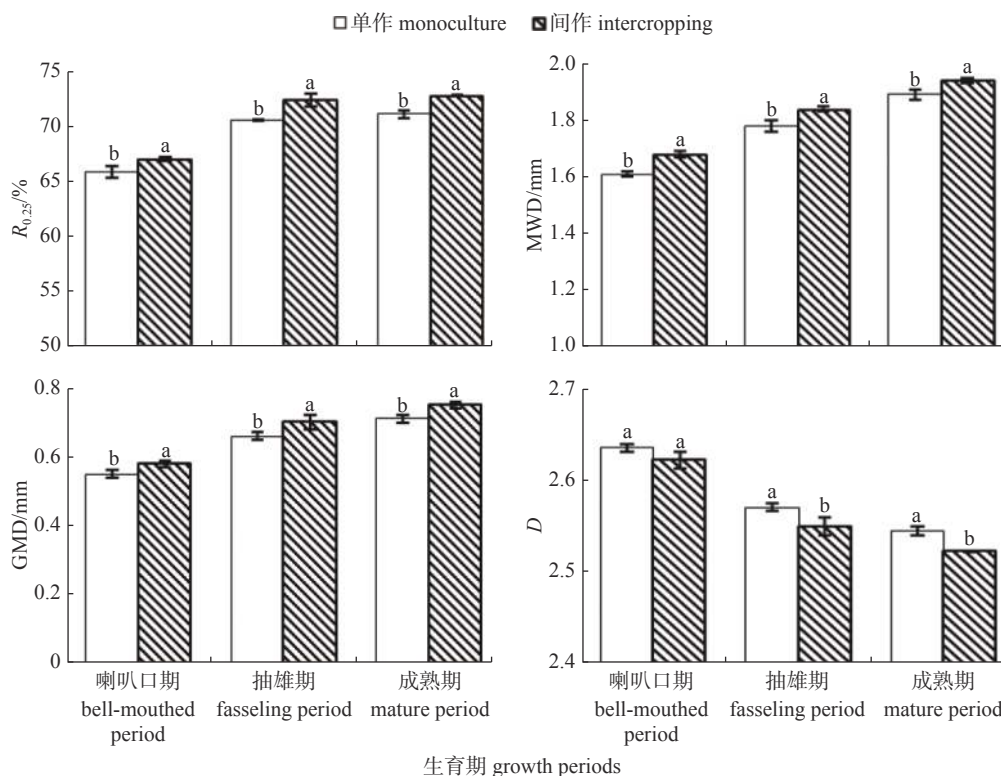
2.4 作物根系形态、根系分泌物与土壤团聚体稳定性指标的相关性分析

由表 5、6 表明： $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 与作物根干质量、总根长、总根表面积、根平均直径、总根体积、根系分泌总糖和总有机酸含量之

间呈极显著正相关关系， D 与作物根干质量、总根长、总根表面积、根平均直径、总根体积、根系分泌总糖和总有机酸含量之间呈极显著负相关关系。作物根系分泌越多的糖类和有机酸类物质，根系形态指标根干质量、总根长、总根表面积和总根体积值越大，土壤团聚体水稳性越强。

3 讨论

间作种植相比单作种植可以扩大作物的根系分布区，更好地吸收利用土壤水分和养分，进而促进根系生长^[18]。由于大豆具有固氮效应，玉米为高需氮作物，且在玉米大豆间作体系中玉米根系可以扩展到大豆行地下部，吸收大豆固定的氮素，进而将极大促进玉米氮养分吸收^[19]。本研究表明：在作物生育中后期，与单作相比，间作玉米和大豆的根干质量、总根长、总根表面积和总根体积都得到了显著提升。赵财等^[20]的研究表明：小麦蚕豆间作相比小麦单作，能显著增加小



注： $R_{0.25}$. >0.25 mm 团聚体百分含量；MWD. 平均质量直径；GMD. 几何平均直径； D . 土壤分形维数；不同小写字母代表各处理间差异显著 ($P<0.05$)；下同。

Note: $R_{0.25}$. percentage content of aggregate greater than 0.25 mm; MWD. mean weight diameter; GMD. geometric mean diameter; D . the fractal dimension; different lowercases mean significant difference ($P<0.05$); the same as below.

图 1 不同种植模式下玉米各生育期土壤团聚体稳定性的变化

Fig. 1 Changes in soil aggregate stability of maize at growth periods under different planting patterns

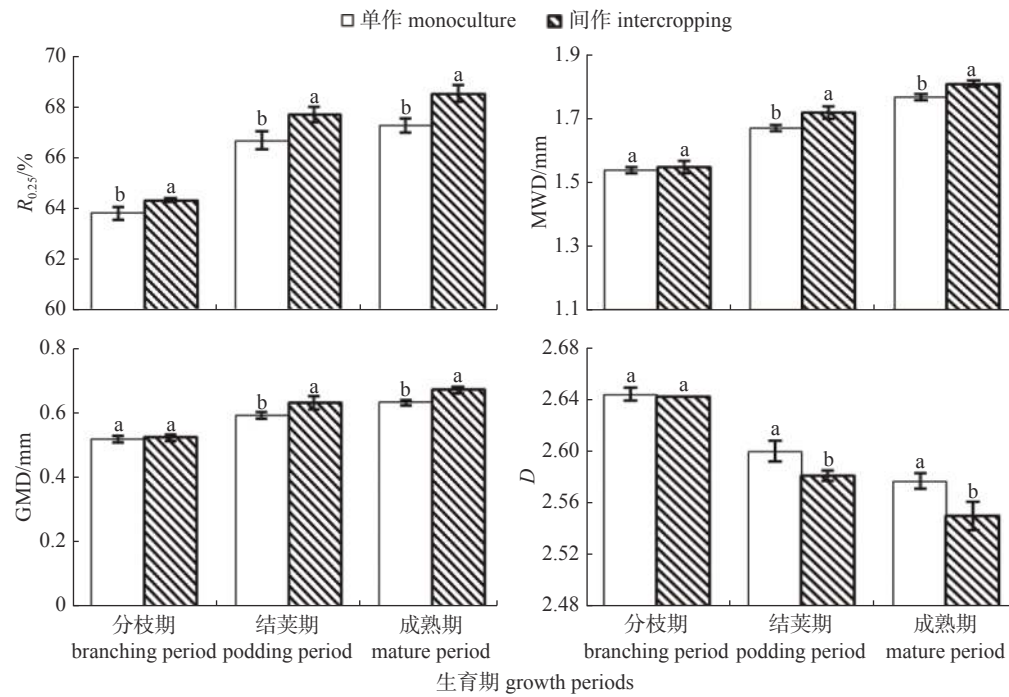


图 2 不同种植模式下大豆各生育期土壤团聚体稳定性的变化

Fig. 2 Changes in soil aggregate stability of soybean at growth periods under different planting patterns

表 5 玉米根系特征、根分泌物与土壤团聚体稳定性指标的相关性

Tab. 5 Correlation of maize root characteristics, root exudates and soil aggregates

项目 item	根干质量 root dry weight	总根长 root length	总根表面积 root surface area	根平均直径 average root diameter	总根体积 root volume	总糖含量 total sugar content	总有机酸含量 total organic acid content
$R_{0.25}$	0.896**	0.903**	0.907**	0.712**	0.877**	0.825**	0.769**
MWD	0.979**	0.964**	0.965**	0.798**	0.956**	0.621**	0.552**
GMD	0.968**	0.960**	0.971**	0.784**	0.955**	0.696**	0.620**
D	-0.961**	-0.956**	-0.967**	-0.785**	-0.947**	-0.703**	-0.640**

注: “**”表示在0.01 水平上极显著相关 ($P<0.01$); 下同。
Note: “**” indicates extremely significant correlation at the 0.01 level; the same as below.

表 6 大豆根系特征、根分泌物与土壤团聚体稳定性指标相关性

Tab. 6 Correlation of soybean root characteristics, root exudates and soil aggregates

项目 item	根干质量 root dry weight	总根长 root length	总根表面积 root surface area	根平均直径 average root diameter	总根体积 root volume	总糖含量 total sugar content	总有机酸含量 total organic acid content
$R_{0.25}$	0.888**	0.754**	0.842**	0.740**	0.726**	0.803**	0.768**
MWD	0.959**	0.853**	0.890**	0.722**	0.853**	0.651**	0.606**
GMD	0.931**	0.820**	0.886**	0.732**	0.799**	0.730**	0.684**
D	-0.937**	-0.839**	-0.904**	-0.717**	-0.817**	-0.693**	-0.668**

麦根体积、根长和根干质量; 李玉英等^[21]的研究也表明: 种间互作增加了玉米和蚕豆在横纵向 2 个尺度上的根质量密度、根长密度、根表面积和根系体积。相比单作种植模式, 间作种植模式能够促进根系分泌物分泌量。有研究表明: 根系分泌物的数量随着植物多样性的增加而显著增加, 且根系分泌物分泌量随着根系生物量的增加

而增加^[22]。在本研究中, 玉米大豆间作后, 由于间作优势的存在, 加之间作显著增加作物根干质量、总根长和总根表面积, 其根系分泌糖和有机酸含量显著增加。

植物物种的多样性和丰富度促进了土壤团聚体的形成和稳定^[23-24]。本研究表明: 间作种植模式对玉米和大豆根干质量、总根长、总根表面积

和总根体积的促进作用能够显著增加 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD, 显著降低 D 。由于作物本身根系构型差异, 大豆总根长、总根表面积和总根体积远低于玉米。相比大豆根系, 玉米根系具有更高的对团聚体的稳定能力。作物根系, 特别是根系生物量和根长密度对土壤团聚体稳定性的积极影响包括: 将微团聚体缠绕固结形成大团聚体; 植物吸水引起土壤的局部干燥从而促进根系分泌物与微团聚体结合形成大团聚体^[25]。本研究表明: 间作对玉米和大豆根系分泌糖和有机酸含量的促进作用能够显著提升土壤团聚体水稳性, 表现为显著增加 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD, 显著降低 D 。根系分泌物对土壤团聚体具有直接作用和间接作用。有研究表明: 小麦根系分泌物的添加量与土壤团聚体增加量呈线性关系^[22]。根系分泌糖类物质既可作为土粒之间的黏结剂, 使土粒黏结形成团聚体, 又可作为根际土壤微生物的碳源和能源物质, 促进土壤微生物量的增加和微生物结构的改善。有研究表明: 作物根系分泌糖类物质对真菌结构具有主要影响而有机酸类物质对细菌结构具有主要影响, 相比作物根系分泌糖类, 根系分泌有机酸类物质能显著增加土壤细菌微生物量, 改变土壤细菌群落结构^[13]。土壤细菌的增加使得其能释放更多糖类物质充当和根系分泌物糖相同的作用以提高土壤团聚体稳定性。真菌菌丝被描述为“带有黏性的网袋”, 因为其分泌的胞外多糖能够将土粒黏结在一起后被菌丝网络所包裹^[12]。

根系分泌物分泌的多糖以及细菌和真菌产生的多糖是土壤团聚化过程的重要黏结剂^[26]。在作物生长旺期, 作物根系分泌总糖和总有机酸含量与 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 呈极显著正相关关系, 与 D 呈极显著负相关关系。说明作物根系分泌糖和有机酸类物质能显著影响水稳性团聚体的数量及其稳定性。研究表明根系生物量对土壤团聚体稳定性的提升具有重要作用^[27]。作物根系根干质量、总根长、总根表面积、总根体积与 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 呈极显著正相关关系, 与 D 呈极显著负相关关系。说明作物根系根干质量、根长、根表面积、根体积的增加也能够提升土壤团聚体稳定性。

4 结论

(1) 在抽雄期, 与单作相比, 间作能显著增

加玉米的根系根干质量、总根长、总根表面积、根系分泌总糖和总有机酸含量, 进而显著提升土壤水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD, 显著降低 D 。在结荚期, 与单作相比, 间作能显著增加大豆的根系根干质量、总根长、总根表面积、总根体积、根系分泌总糖含量和总有机酸含量, 进而显著提升土壤水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD, 显著降低 D 。

(2) 玉米和大豆的根系根干质量、总根长、总根表面积、根平均直径、总根体积、根系分泌总糖和总有机酸含量与土壤水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 呈极显著正相关关系, 与 D 呈极显著负相关关系。

(3) 在抽雄期/结荚期, 由于间作相比单作能够显著提高玉米/大豆根系根干质量、总根长、总根表面积、根系分泌总糖和总有机酸含量, 坡耕地红壤团聚体的水稳性能够得到显著提升。

[参考文献]

- [1] WILLEY R W. Resource use in intercropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 1990, 17(1): 215. DOI: [10.1016/0378-3774\(90\)90069-B](https://doi.org/10.1016/0378-3774(90)90069-B).
- [2] RUSINAMHODZI L, CORBEELS M, NYAMAN-GARA J, et al. Maize-grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholder farmers in central Mozambique[J]. *Field Crops Research*, 2012, 136(5): 12. DOI: [10.1016/j.fcr.2012.07.014](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.014).
- [3] KERMAH M, FRANKE A C, ADJEI-NSIAH S, et al. Maize-grain legume intercropping for enhanced resource use efficiency and crop productivity in the Guinea savanna of Northern Ghana[J]. *Field Crops Research*, 2017, 213: 38. DOI: [10.1016/j.fcr.2017.07.008](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.008).
- [4] GITARI H I, KARANJA N N, GACHENE C K K, et al. Nitrogen and phosphorous uptake by potato (*Solanum tuberosum*, L.) and their use efficiency under potato-legume intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2018, 222: 78. DOI: [10.1016/j.fcr.2018.03.019](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.03.019).
- [5] GAO Y, WU P T, ZHAO X N, et al. Growth, yield, and nitrogen use in the wheat/maize intercropping system in an arid region of Northwestern China[J]. *Field Crops Research*, 2014, 167(5): 19. DOI: [10.1016/j.fcr.2014.07.003](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.003).
- [6] WORKU W. Sequential intercropping of common bean and mung bean with maize in southern ethiopia[J]. *Experimental Agriculture*, 2014, 50(1): 90. DOI: [10.1017/S0014479713000434](https://doi.org/10.1017/S0014479713000434).
- [7] TANG X Y, BERNARD L, BRAUMAN A, et al. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,

- 2014, 75: 86. DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.04.001](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.04.001).
- [8] LATATI M, BARGAZ A, BELARBI B, et al. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 72: 80. DOI: [10.1016/j.eja.2015.09.015](https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.015).
- [9] DUCHENE O, VIAN J F, CELETTE F. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 240: 148. DOI: [10.j.agee.2017.02.019](https://doi.org/10.j.agee.2017.02.019).
- [10] BLANKINSHIP J C, FONTE S J, SIX J, et al. Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem[J]. *Geoderma*, 2016, 272: 39. DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.03.008](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.008).
- [11] MARDHIAH U, CARUSO T, GURNELL A, et al. Just a matter of time: fungi and roots significantly and rapidly aggregate soil over four decades along the Tagliamento River, NE Italy[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 133. DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.04.012](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.04.012).
- [12] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7. DOI: [10.1016/j.still.2004.03.008](https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008).
- [13] SHI S J, RICHARDSON A E, O'CALLAGHAN M, et al. Effects of selected root exudate components on soil bacterial communities[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2011, 77(3): 600. DOI: [10.1111/j.1574-6941.2011.01150.x](https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01150.x).
- [14] 杨培岭, 罗运培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896.
- [15] LU J, ZHENG F L, LI G F, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 161: 79. DOI: [10.1016/j.still.2016.04.002](https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.002).
- [16] PAUL B K, VANLAUWE B, AYUKE F, et al. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 14. DOI: [10.1016/j.agee.2012.10.003](https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.003).
- [17] FOKOM R, ADAMOU S, TEUGWA M C, et al. Glomalin related soil protein, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use variation in the humid forest zone of south Cameroon[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 120: 69. DOI: [10.1016/j.still.2011.11.004](https://doi.org/10.1016/j.still.2011.11.004).
- [18] GAO Y, DUAN A W, QIU X Q, et al. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1): 199. DOI: [10.1016/j.agwat.2010.08.021](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.021).
- [19] LYU Y, FRANCIS C, WU P T, et al. Maize-soybean intercropping interactions above and below ground[J]. *Crop Science*, 2014, 54(3): 914. DOI: [10.2135/cropsci.2013.06.0403](https://doi.org/10.2135/cropsci.2013.06.0403).
- [20] 赵财, 周海燕, 柴强, 等. 不同供水水平下丁香酚和间作蚕豆对小麦根系生长的互作效应[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 133. DOI: [10.11686/cyxb20140216](https://doi.org/10.11686/cyxb20140216).
- [21] 李玉英, 胡汉升, 程序, 等. 种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(6): 1617.
- [22] 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: 44641. DOI: [10.1038/srep44641](https://doi.org/10.1038/srep44641).
- [23] ERKTAN A, CÉCILLON L, GRAF F. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics[J]. *Plant and Soil*, 2016, 398(1/2): 121. DOI: [10.1007/s11104-015-2647-6](https://doi.org/10.1007/s11104-015-2647-6).
- [24] 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, 273: 285. DOI: [10.1007/s11104-013-1791-0](https://doi.org/10.1007/s11104-013-1791-0).
- [25] GRYZE S D, SIX J, BRITS C, et al. A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(1): 55. DOI: [10.1016/j.soilbio.2004.07.024](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.024).
- [26] SPOHN M, GIANI L. Water-stable aggregates, glomalin-related soil protein, and carbohydrates in a chronosequence of sandy hydromorphic soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(9): 1505. DOI: [10.1016/j.soilbio.2010.05.015](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.05.015).
- [27] 吕渡, 杨亚辉, 赵文慧, 等. 不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合[J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 3979. DOI: [10.5846/stxb201709021585](https://doi.org/10.5846/stxb201709021585).

责任编辑: 何承刚