

间作对玉米根系分泌物及团聚体稳定性的影响

王婷, 李永梅, 王自林, 肖靖秀, 白录顺, 范茂攀

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要: 通过田间小区试验种植玉米(玉米单作、玉米//大豆、玉米//马铃薯), 测定3个生育期(拔节期、大喇叭口期、抽雄期)玉米根系分泌总糖含量、总有机酸含量和土壤团聚体状况, 分析间作对玉米根系分泌物及团聚体稳定性的影响。结果表明: 玉米根系分泌总糖含量和总有机酸含量随生育期的推移而增加, 间作显著提高玉米根系分泌总糖含量和总有机酸含量, 玉米//马铃薯>玉米//大豆。在抽雄期, 玉米//大豆、玉米//马铃薯相比玉米单作>0.25 mm水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)分别显著提高6.19%, 8.17%; 平均质量直径(MWD)分别提高5.04%, 10.08%; 几何平均直径(GMD)分别提高6.12%, 12.24%; 分形维数(D)分别显著降低0.72%, 1.09%; 团聚体破坏率(PAD)分别显著降低16.77%, 26.08%。在根系分泌物最大的抽雄期, 玉米根系分泌总糖含量、总有机酸含量与 $R_{0.25}$, GMD, D , PAD呈极显著相关关系($P<0.01$)。因此, 间作可通过增加玉米根系分泌总糖含量和总有机酸含量, 进而提高土壤团聚体的稳定性。

关键词: 间作; 根系分泌物; 土壤团聚体

中图分类号: S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0185-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.029

Effects of Intercropping on Maize Root Exudates and Soil Aggregate Stability

WANG Ting, LI Yongmei, WANG Zilin, XIAO Jingxiu, BAI Lushun, FAN Maopan

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

Abstract: The field experiment with different planting patterns (maize monoculture, maize//soybean intercropping and maize//potato intercropping) of maize was carried out, and root exudates of total sugars and total organic acids and soil aggregates at jointing, bell-mouthed, and tasseling stages of maize growth were measured. The influence of intercropping on maize root exudates and soil aggregate stability was explored. The results showed that root exudates of total sugars and total organic acids increased with maize growth. Intercropping significantly increased maize root exudates of total sugars and total organic acids. Maize//potato intercropping was better than maize//soybean intercropping. Compared with maize monoculture, maize//soybean intercropping and maize//potato intercropping have increased >0.25 mm water stable aggregate ($R_{0.25}$) by 6.19% and 8.17%, mean weight diameter (MWD) by 5.04% and 10.08%, geometric mean diameter (GMD) by 6.12% and 12.24%, have significantly decreased fractal dimension (D) by 0.72% and 1.09%, and portion of aggregate destruction (PAD) by 16.77% and 26.08%, respectively at tasseling stage. At tasseling stage with maximum root exudates, total sugars content and total organic acids content were significantly correlated with $R_{0.25}$, GMD, D , and PAD ($P<0.01$). These results indicate that intercropping can enhance maize root exudates of total sugars and total organic acids and thus improve soil aggregate stability.

Keywords: intercropping; root exudates; soil aggregate

土壤团聚体作为表征土壤质量的一项重要指标, 其较高的稳定性能够保持土壤生产力, 减少土壤侵蚀和退化, 进而最大限度的降低环境污染风险^[1]。植物能够向根系转运20%~50%同化产物, 其中10%~18%通过根系分泌物释放到土壤中^[2], 其作为有机胶结剂能够增加土壤颗粒的结合强度, 促进土壤团聚体

的形成, 提高土壤团聚体稳定性^[3]。根系分泌有机化合物根据其化学特性进行分类, 包括黏胶和以糖类、有机酸为主的化合物^[4]。苑亚茹等^[5]证实了外源添加糖类、有机酸于黑土中短期内显著促进了>0.25 mm大团聚体, 尤其是>2 mm团聚体的形成, 显著增强了土壤团聚体的稳定性。宋日等^[6]也证实了玉米

收稿日期: 2018-01-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(41661063, 41461059)

第一作者: 王婷(1993—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事坡耕地水土保持研究。E-mail: 15559907783@qq.com

通信作者: 范茂攀(1977—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事坡耕地水土保持与持续利用研究。E-mail: mpfan@126.com

根系分泌物添加到黑土中,显著提高土壤多糖含量、水稳性大团聚体比例、水稳性团聚体稳定性。已有的根系分泌物对土壤团聚体的影响多为室内模拟试验,在现实农业生产中存在复杂的根土互作效应,并不能很好的说明大田情况下根系分泌物与土壤团聚体之间的相关关系。

合理的作物间作可以实现对光热水肥的高效利用^[7],提高作物单位面积产量,在当今世界农业生产中发挥着重要作用^[8]。肖靖秀等^[9-10]研究发现,小麦蚕豆间作可提高小麦根系分泌总糖和有机酸量。玉米作为世界主要粮食作物之一,广泛应用于间作种植模式中^[11],玉米与其他作物间作之后,是否可以提高玉米根系分泌总糖和总有机酸量,进而促进土壤团聚体的形成?课题组通过玉米//大豆、玉米//马铃薯种植的前期研究^[12]表明,间作促进玉米根系的增加,从而影响土壤团聚体状况,尚未对间作影响根系分泌物进行研究。本论文主要研究间作对根系分泌总糖含量和总有机酸含量的影响,从而提高土壤团聚体的稳定性,为不同种植模式改善土壤团聚体状况和肥力提供理论基础,为坡耕地农作物合理配置提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和作物品种

试验于 2017 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,中心地理坐标为 102°58'39.7"E,25°2'28.8"N,坡度为 10°,海拔 2 234 m,年平均气温 16 °C,年降水量 900~1 000 mm,属亚热带季风气候。供试土壤有机质 30.15 g/kg,全氮 1.14 g/kg,碱解氮 115.3 mg/kg,速效磷 6.41 mg/kg,速效钾 92.36 mg/kg,pH 6.29。供试品种玉米为云瑞 88,大豆为滇杂 7 号,马铃薯为会-2。

1.2 试验设计

试验设 3 个处理,处理 1:玉米单作;处理 2:玉米//大豆;处理 3:玉米//马铃薯,每个处理 3 次重复,共 9 个小区,区组内小区随机排列。各小区规格均为 4 m×10 m,坡度为 10°。玉米单作采用等行距种植模式,行距 80 cm,株距 25 cm;玉米//大豆采用 2:2 种植模式(2 行玉米间作 2 行大豆),玉米行距 40 cm,株距 25 cm,大豆行距 40 cm,株距 20 cm,玉米和 大豆行距 40 cm;玉米//马铃薯采用 2:2 种植模式(2 行玉米间作 2 行马铃薯),玉米行距 40 cm,株距 25 cm,马铃薯行距 40 cm,株距 30 cm,玉米和马铃薯行距 40 cm。

玉米施 N 315 kg/hm²,P₂O₅ 120 kg/hm²,K₂O 120 kg/hm²,其中氮肥分 2 次(50%作基肥,50%作追肥),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;马铃薯施 N 150 kg/hm²,P₂O₅ 150 kg/hm²,K₂O 225 kg/hm²,全部作基肥施用。

1.3 样品收集

在玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄期采集植株样品和土壤样品。每个小区选 2 株长势居中的玉米,1 株斩断地上部后,开挖 30 cm×30 cm×30 cm 土体,剔除根系、杂物后混匀土壤,用四分法选取 1 kg 带回实验室风干;另外 1 株为保留完整的作物根系,将带有土体的植株整株带回实验室。

将带有土体的植株地下部浸入装水圆桶中,使植株根系慢慢完整露出,用自来水多次清洗根系后再用蒸馏水清洗 3 次而后放入大号黑色不透光自封袋中收集植株根系分泌物(200 mL 5 mg/L 百里酚浸泡 3 min 后 200 mL 0.005 mol/L CaCl₂ 收集 2 h)。根系分泌物收集液在 40 °C 条件下旋转蒸发 15 min 后,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 °C 冰箱保存^[10]。

1.4 样品分析

根系分泌总糖含量测定采用蒽酮比色法;总有机酸含量测定采用 HPLC 法,仪器型号为 Agilent1200 高效液相色谱仪,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 °C,流速 1 mL/min,进样量 10 μL,检测波长 214 nm,分析时间 10 min。

带回实验室的土壤样品在室内风干后,置于套筛(孔径依次为 0.25,0.5,1,2,5 mm)顶部,安装底盒和筛盖后,以左右振幅 10 cm,频率 150 次/min,振荡 2 min。对各粒级机械稳定性团聚体称重后计算其质量百分含量,并按各粒级质量比收集 100 g 混合土样。将 100 g 混合土样放置于团聚体分析仪中,保证水没过 5 mm 筛底部,且振动时不没过其顶部,以上下振幅 3 cm,频率 30 次/min,分析 20 min 后将各粒级水稳性团聚体冲入铝盒中,105 °C 烘干 12 h 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($R_{0.25}$):

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

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,mm)^[13]:

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

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(%)。

几何平均直径(GMD, mm)^[13]:

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

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(%)。

分形维数(D)的计算采用杨培岭等^[14]推导的公式:

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

对上式左右两边取对数,得 $\lg[M(r < \bar{R}_i)/M_T] = (3-D)\lg(\bar{R}_i/R_{\max})$, 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, 从而计算 D 。

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)。

结构体破坏率(PAD, %)^[15]:

$$PAD = \frac{w_{d0.25} - w_{w0.25}}{w_{d0.25}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $w_{d0.25}$ 为 >0.25 mm 机械稳定性团聚体质量(g); $w_{w0.25}$ 为 >0.25 mm 水稳性团聚体质量(g)。

使用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理, 用 SPSS 23.0 软件进行单因素 ANOVA 分析、Pearson 相关分析。

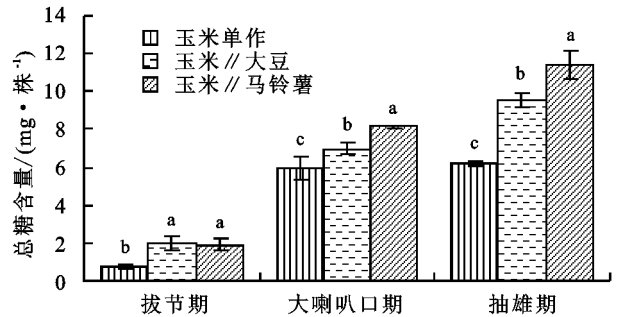
2 结果与分析

2.1 不同种植模式下玉米根系分泌物量的变化

2.1.1 不同种植模式下玉米根系分泌总糖含量的变化 由图 1 可知, 玉米单作、玉米//大豆、玉米//马铃薯, 玉米根系分泌总糖含量随着生育期的推移均表现为不断升高趋势。在拔节期, 玉米//大豆、玉米//马铃薯相比玉米单作, 玉米根系分泌总糖含量分别显著提高 155.84%, 148.05% ($P < 0.05$); 在大喇叭口期, 玉米//大豆、玉米//马铃薯相比玉米单作, 玉米根系分泌总糖含量分别显著提高 17.45%, 36.41% ($P < 0.05$); 在抽雄期, 玉米//大豆、玉米//马铃薯相比玉米单作, 玉米根系分泌总糖含量分别显著提高 54.46%, 84.93% ($P < 0.05$)。

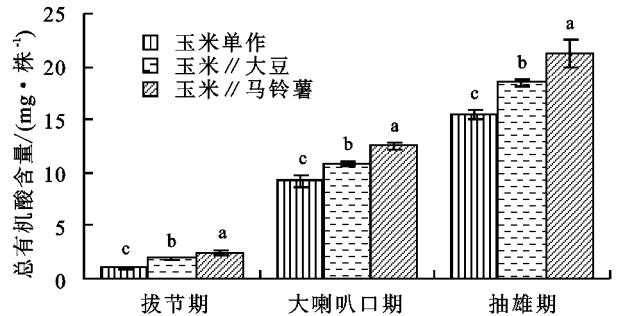
2.1.2 不同种植模式下玉米根系分泌总有机酸含量的变化 由图 2 可知, 与玉米根系分泌总糖含量相同, 玉米单作、玉米//大豆、玉米//马铃薯, 玉米根系分泌总有机酸含量随着生育期的推移均表现为不断升高趋势。在拔节期, 玉米//大豆、玉米//马铃薯相比玉米单作, 玉米根系分泌总有机酸含量分别显著提高 83.65%, 128.85% ($P < 0.05$); 在大喇叭口期,

玉米//大豆、玉米//马铃薯相比玉米单作, 玉米根系分泌总有机酸含量分别显著提高 18.04%, 35.98% ($P < 0.05$); 在抽雄期, 玉米//大豆、玉米//马铃薯相比玉米单作, 玉米根系分泌总有机酸含量分别显著提高 19.37%, 37.44% ($P < 0.05$)。



注: 图中字母表示同一生育期, 不同种植模式下玉米根系分泌总糖含量差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 不同种植模式下 3 个生育期玉米根系分泌总糖含量



注: 图中字母表示同一生育期, 不同种植模式下玉米根系分泌总有机酸含量差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同种植模式下 3 个生育期玉米根系分泌总有机酸含量

2.2 不同种植模式下土壤团聚体稳定性分析

由表 1 可知, 在同一种种植模式下, 随着生育期的推移, 水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 不断增加, PAD 不断降低。玉米单作与玉米间作在抽雄期水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 、PAD 均达到显著性差异。

在 3 个生育期, 玉米//大豆、玉米//马铃薯下水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 均高于玉米单作。在拔节期, 与玉米单作相比, 玉米//大豆、玉米//马铃薯水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 分别显著提高 9.08%, 6.82% ($P < 0.05$); 在大喇叭口期, 与玉米单作相比, 玉米//马铃薯水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 显著提高 7.81% ($P < 0.05$); 在抽雄期, 与玉米单作相比, 玉米//大豆、玉米//马铃薯水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 分别显著提高 6.19%, 8.17% ($P < 0.05$)。

在 3 个生育期, 玉米//大豆、玉米//马铃薯下 PAD 均低于玉米单作。在拔节期, 与玉米单作相比, 玉米//大豆、玉米//马铃薯 PAD 分别显著降低 12.11%, 7.59% ($P < 0.05$); 在大喇叭口期, 与玉米单作相比, 玉米//马铃薯 PAD 显著降低 21.97% ($P < 0.05$); 在抽雄期, 与玉米单作相比, 玉米//大豆、玉米//马铃薯 PAD 分别显著降低 16.77%, 26.08% ($P < 0.05$)。

由表 1 可知,在同一种植模式下,随着生育期的推移,水稳性团聚体 MWD、GMD 不断增加。在拔节期,与玉米单作相比,玉米//大豆、玉米//马铃薯水稳性团聚体 GMD 分别显著提高 7.69%、7.69% ($P<0.05$);在大喇叭口期,与玉米单作相比,玉米//马铃薯水稳性

团聚体 MWD、GMD 分别显著提高 8.26%、13.04% ($P<0.05$);在抽雄期,与玉米单作相比,玉米//大豆水稳性团聚体 MWD、GMD 分别提高 5.04%、6.12%,玉米//马铃薯水稳性团聚体 MWD 提高 10.08%,GMD 显著提高 12.24% ($P<0.05$)。

表 1 不同种植模式下玉米 3 个生育期土壤团聚体稳定性指标

生育期	种植模式	$R_{0.25}/\%$	MWD/mm	GMD/mm	PAD/ $\%$
拔节期	玉米单作	55.15±0.64b	0.90±0.07a	0.39±0.01b	40.47±0.54a
	玉米//大豆	60.16±1.00a	0.95±0.03a	0.42±0.01a	35.57±1.55b
大喇叭口期	玉米//马铃薯	58.91±0.58a	0.98±0.10a	0.42±0.02a	37.40±1.15b
	玉米单作	61.23±1.65b	1.09±0.01b	0.46±0.02b	35.19±1.56a
	玉米//大豆	61.58±0.81b	1.05±0.05b	0.45±0.01b	33.08±0.67a
抽雄期	玉米//马铃薯	66.01±1.37a	1.18±0.02a	0.52±0.01a	27.46±1.85b
	玉米单作	62.03±0.59b	1.19±0.06a	0.49±0.01b	32.02±0.90a
	玉米//大豆	65.87±1.43a	1.25±0.07a	0.52±0.02ab	26.65±2.00b
	玉米//马铃薯	67.10±2.22a	1.31±0.10a	0.55±0.04a	23.67±2.65b

注:表中数据为平均值±标准误差,同列字母表示同一生育期不同种植模式下差异显著($P<0.05$)。

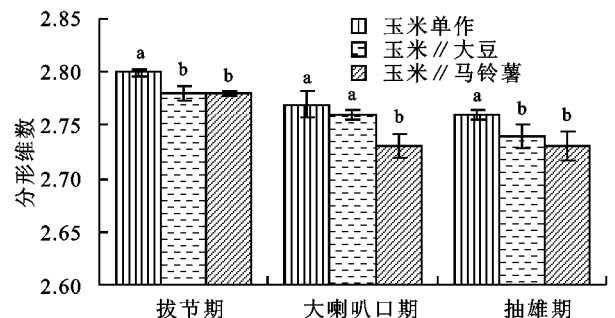
2.3 不同种植模式下土壤水稳性团聚体分形维数

土壤分形维数是反映土壤结构几何形状的参数,团粒结构粒径分布的分形维数越小,土壤团聚体稳定性越好^[16]。由图 3 可知,在同一种植模式下,随着生育期的推移,水稳性团聚体 D 不断减小。玉米单作与玉米间作在拔节期和抽雄期水稳性团聚体 D 均达到显著性差异。在 3 个生育期,土壤水稳性团聚体 D 分布范围为 2.73~2.80。在拔节期,与玉米单作相比,玉米//大豆、玉米//马铃薯 D 分别显著降低 0.71%、0.71% ($P<0.05$);在大喇叭口期,与玉米单作相比,玉米//马铃薯 D 显著降低 1.44% ($P<0.05$);在抽雄期,与玉米单作相比,玉米//大豆、玉米//马铃薯 D 分别显著降低 0.72%、1.09% ($P<0.05$)。

2.4 根系分泌物与土壤团聚体稳定性指标相关分析

由表 2 可知,土壤团聚体稳定性指标中 $R_{0.25}$ 、GMD、 D 、PAD 受玉米根系分泌总糖含量和总有机酸含量的影响较大, $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 与根系总糖分泌量、总有机酸分泌量呈正相关关系, D 、PAD 与根系总糖分泌量、总有机酸分泌量呈负相关关系。在大

喇叭口期,总糖分泌量、总有机酸分泌量与 $R_{0.25}$ 、GMD 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$),与 D 、PAD 呈极显著负相关关系 ($P<0.01$),与 MWD 无显著相关关系。在抽雄期,总糖分泌量、总有机酸分泌量与 $R_{0.25}$ 、GMD 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$),与 MWD 呈显著正相关关系 ($P<0.05$),与 D 、PAD 呈极显著负相关关系 ($P<0.01$)。



注:图中字母表示同一生育期,不同种植模式下土壤水稳性团聚体 D 差异显著 ($P<0.05$)。

图 3 不同种植模式下玉米 3 个生育期土壤水稳性团聚体分形维数

表 2 3 个生育期玉米根系分泌物与土壤团聚体稳定性指标相关性

生育期	根系分泌物	$R_{0.25}$	MWD	GMD	D	PAD
拔节期	总糖	0.845**	0.588	0.827**	-0.834**	-0.741*
	总有机酸	0.781*	0.542	0.842**	-0.817**	-0.710*
大喇叭口期	总糖	0.891**	0.588	0.812**	-0.874**	-0.936**
	总有机酸	0.842**	0.592	0.782**	-0.824**	-0.899**
抽雄期	总糖	0.926**	0.685*	0.824**	-0.911**	-0.955**
	总有机酸	0.902**	0.718*	0.845**	-0.899**	-0.943**

注:*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$ 。

3 讨论

已有研究^[9-10]表明,植物生育期影响其根系分泌糖和有机酸能力,小麦根系总糖分泌速率表现为孕穗期>拔节期>灌浆期>分蘖期,小麦、蚕豆根系有机酸分泌量表现为随生育期推移而升高。本研究结果与其一致,玉米根系分泌总糖含量、总有机酸含量随

着生育期的推移不断升高,直至抽雄期达到最大值。Ström 等^[17]研究表明,不同生态型的植物分泌有机酸特征存在差异,本研究进一步证实间作能够改变玉米根系分泌物的分泌特征,在 3 个生育期,玉米间作根系分泌总糖含量和总有机酸含量显著高于玉米单作,这可能是由于玉米//大豆、玉米//马铃薯提升了

氮磷钾养分的吸收利用^[18-19],增强作物碳氮代谢,促进作物根系有机酸、糖代谢,进而提高根系分泌物含量;也可能是由于间作使微生物群落结构更加丰富,提高抑制病原菌的能力,降低作物土传病害的发生,增强根系活力,促进根系分泌物的分泌^[20]。

本研究选用水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、 D 、PAD 衡量土壤团聚体稳定性。根系和菌丝的缠绕使土粒团聚为 >0.25 mm 的土壤团聚体,因此 0.25 mm 被广泛接受为划分大团聚体和微团聚体的分界线,其含量是定量评价土壤团聚体的重要指标, >0.25 mm 水稳性团聚体含量越高,土壤稳定性越好^[21];基于机械稳定性和水稳性 $R_{0.25}$ 下的团聚体颗粒分散度 PAD,描述土壤团聚体受水力破坏而导致的分散程度的大小,PAD 越小,说明团聚体稳定性越强。在 3 个生育期,玉米单作、玉米//大豆、玉米//马铃薯, >0.25 mm 水稳性团聚体范围分别为 55.15%~62.03%,60.16%~65.87%,58.91%~67.10%,抽雄期玉米//大豆和玉米//马铃薯相比玉米单作,PAD 显著降低,表明间作能够有效提高耕层土壤水稳性大团聚体含量,降低 PAD,这与苹果白三叶间作的研究结果一致^[22]。评价土壤团聚体稳定性的常用方法为湿筛法,由此可以计算出土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD,已有研究^[12]表明,衡量土壤团聚体平均直径指标 MWD 和 GMD 值越大,土壤团聚体稳定性越好,在本研究中玉米抽雄期 MWD、GMD 均表现为间作种植模式高于单作种植模式。已有研究^[23]发现,土壤团聚体的性状具有明显的分形特征,把土壤分形维数作为反映土壤结构几何形体的参数,并利用分形维数探究土壤团聚体大小分布特征,其值越小,土壤稳定性越强,在玉米不同种植模式下,3 个生育期水稳性团聚体 D 为 2.73~2.80,在抽雄期,玉米//大豆、玉米//马铃薯 D 显著低于玉米单作,玉米间作能够改善土壤团聚体结构,进而提高土壤团聚体稳定性。玉米间作种植模式下土壤团聚体稳定性显著高于玉米单作,可能因为间作促进玉米根系总糖分泌量,除作为土粒胶结剂黏结土粒外还可作为碳源供微生物利用,提高根际细菌的活力,促进细菌释放多糖等物质,成为土粒间有效的胶黏物质,有利于单个土粒转化为微团聚体;间作促进玉米根系总有机酸分泌量,提高根际真菌的活力,促进其菌丝生长,对微团聚体具有缠绕作用,有利于微团聚体转化为大团聚体^[7]。

本文选取 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、 D 、PAD 作为根系分泌物与土壤团聚体稳定性相关关系指标。Pirmoradian 等^[24]和 Ahmadi 等^[25]研究表明,土壤稳定性与 GMD 的相关系数高于 MWD,与 D 的相关系数高于 GMD, D 相比 MWD、GMD 能更好的反映土壤团聚体稳定性状况。与之相一致,本研究中玉米根系分泌总糖含量、总有机酸含量与与水稳性团聚体 D 、 $R_{0.25}$ 、PAD 相关性优于

MWD、GMD。水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 、 D 、PAD 能更好地反映玉米根系分泌总糖含量、总有机酸含量的变化,说明用水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 、 D 、PAD 作为评价根系分泌物对土壤团聚体稳定性的影响参数更为适宜。

4 结论

(1)随着生育期的推移,玉米根系分泌总糖含量、总有机酸含量不断提高,且 3 个生育期玉米间作相比玉米单作显著提高根系分泌总糖含量、总有机酸含量。在抽雄期,玉米//大豆、玉米//马铃薯相比玉米单作,玉米根系分泌总糖含量分别显著提高 54.46%,84.93% ($P<0.05$),总有机酸含量分别显著提高 19.37%,37.44% ($P<0.05$)。

(2)在玉米抽雄期,玉米//大豆、玉米//马铃薯相比玉米单作土壤水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 分别显著提高 6.19%,8.17% ($P<0.05$),MWD 分别提高 5.04%,10.08%,GMD 分别提高 6.12%,12.24%, D 分别显著降低 0.72%,1.09% ($P<0.05$),PAD 分别显著降低 16.77%,26.08% ($P<0.05$)。

(3)在玉米抽雄期,根系分泌总糖、总有机酸量与土壤水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 、GMD、 D 、PAD 间达到极显著相关关系 ($P<0.01$),与 MWD 达到显著相关关系 ($P<0.05$)。

(4)玉米间作通过提高根系分泌总糖含量、总有机酸含量,能够增强团聚体稳定性,为坡耕地农作物合理配置提供参考价值,且玉米//马铃薯优于玉米//大豆。

参考文献:

- [1] An S S, Mentler A, Mayer H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2010, 81: 226-233.
- [2] Kuijken R C, Van Eeuwijk F A, Marcelis L F, et al. Root phenotyping: From component trait in the lab to breeding [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66 (18): 5389-5401.
- [3] Czarnes S, Hallett P D, Bengough A G, et al. Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(3): 435-443.
- [4] 李春俭.高级植物营养学[M].北京:中国农业大学出版社,2008:61-65.
- [5] 苑亚茹,韩晓增,李禄军,等.低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J].*水土保持学报*,2011,25(6):96-99.
- [6] 宋日,刘利,马丽艳,等.作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响[J].*南京农业大学学报*,2009,32(3):93-97.
- [7] Mao L, Zhang L, Zhao X, et al. Crop growth, light utilization and yield of relay intercropped cotton as affected by plant density and a plant growth regulator [J].

- Field Crops Research, 2014, 155: 67-76.
- [8] Li L, Tilman D, Lambers H, et al. Plant diversity and overyielding: Insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture [J]. *New Phytologist*, 2014, 203(1): 63-69.
- [9] 肖靖秀, 郑毅, 汤利, 等. 小麦-蚕豆间作对根系分泌糖和氨基酸的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(11): 1825-1830.
- [10] 肖靖秀, 郑毅, 汤利. 小麦-蚕豆间作对根系分泌低分子量有机酸的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1739-1744.
- [11] Seran T H, Brintha I. Review on maize based intercropping [J]. *Journal of Agronomy*, 2010, 9(3): 135-145.
- [12] 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.
- [13] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution [J]. *Methods of Soil Analysis Part. Physical & Mineralogical Methods*, 1986: 425-442.
- [14] 杨培岭, 罗远培, 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): 1896-1896.
- [15] 陈山, 杨峰, 林杉, 等. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 211-216.
- [16] 姜敏, 刘毅, 刘闯, 等. 丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 265-270.
- [17] Ström L, Olsson T, Tyler G. Differences between calcifuge and acidifuge plants in root exudation of low-molecular organic acids [J]. *Plant and Soil*, 1994, 167(2): 239-245.
- [18] 尹元萍, 张雅琼, 申毓哈, 等. 玉米//大豆间作中大豆根系生长及氮磷养分吸收的特点[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(6): 2305-2310.
- [19] 马心灵, 朱启林, 耿川雄, 等. 不同氮水平下作物养分吸收与利用对玉米//马铃薯产量优势的贡献[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1265-1273.
- [20] 杨智仙, 汤利, 郑毅, 等. 不同品种小麦与蚕豆间作对蚕豆枯萎病发生、根系分泌物和根际微生物群落功能多样性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 570-579.
- [21] 李欣雨, 夏建国, 田汶艳. 稻田植茶后土壤团聚体水稳性变化特征及影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 148-153.
- [22] 王英俊, 李同川, 张道勇, 等. 间作白三叶对苹果//白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响[J]. *草地学报*, 2013, 21(3): 485-493.
- [23] 李娟, 韩霁昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 248-253.
- [24] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments [J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(2): 227-234.
- [25] Ahmadi A, Neyshabouri M R, Rouhipour H, et al. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(3/4): 305-311.
- (上接第 184 页)
- [17] Dexter A R, Richard G, Arrouays D, et al. Complexed organic matter controls soil physical properties [J]. *Geoderma*, 2008, 144: 620-627.
- [18] Kastanek F J, Nielsen D R. Description of soil water characteristics using a cubic spline interpolation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(2): 279-283.
- [19] Kutílek M, Nielsen D R. *Soil Hydrology* [M]. Germany: Cremlingen-Destedt Catena Verlag, 1994: 134-140.
- [20] 鲁如坤. *土壤农业化学分析法* [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 89-93.
- [21] 谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 671-678.
- [22] 王子龙, 胡斐南, 赵勇钢, 等. 土壤胶结物质分布特征及其对黄土大团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 331-336.
- [23] 李雪垠, 李朝霞, 王天巍, 等. 紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 662-669.
- [24] 王红兰, 唐翔宇, 鲜青松, 等. 紫色土水分特征曲线室内测定方法的对比[J]. *水科学进展*, 2016, 27(2): 240-248.
- [25] 何咏琪, 黄晓东, 候秀闵, 等. 基于 3S 技术的草原鼠害监测方法研究[J]. *草业学报*, 2013, 22(3): 33-40.
- [26] 舒杨. 草原鼠害的生态防治技术研究及其应用[D]. 成都: 四川农业大学, 2014.
- [27] 杨莹博, 辛小娟, 艾得协措, 等. 鼯鼠土丘植被恢复演替过程中的物种多样性变化[J]. *草业学报*, 2010, 19(1): 14-20.
- [28] Lionel A, Yves C. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems [J]. *Geoderma*, 2009, 152(1/2): 85-94.
- [29] Huo L, Chen Z, Zou Y, et al. Effect of zoige alpine wetland degradation on the density and fractions of soil organic carbon [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 287-295.
- [30] 韩立辉, 尚占环, 任国华, 等. 青藏高原“黑土滩”退化草地植物和土壤对斑秃面积变化的响应[J]. *草业学报*, 2011, 20(1): 1-6.
- [31] Rui Y C, Wang S P, Xu Z H, et al. Warming and grazing affect soil labile carbon and nitrogen pools differently in an alpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau in China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(6): 903-914.