

间作模式下玉米/大豆的根系特征及其与团聚体稳定性的关系

白录顺, 范茂攀, 王自林, 王婷, 邓超, 李永梅

(云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要:通过玉米单作、大豆单作和玉米大豆间作种植,利用 WINRHIZ 软件分析不同种植模式下 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 不同深度土层的作物根系的根系密度、根长、根表面积等根系特征指标,并采用湿筛法对各个土层团聚体稳定性进行分析,研究根系特征对团聚体稳定性的影响。结果表明:单间作条件下,玉米和大豆的根系密度、根长、根表面积、根长密度、根体积等随着土层深度的增加而减少,间作模式下根系密度、根体积在 0—10 cm 土层分别比单作增加了 14.79% 和 11.74%。间作模式下各土层团聚体平均重量直径和平均几何直径显著高于单作模式,团聚体破坏率、可蚀性因子 K 值、分形维数(D)显著小于单作模式,0—10 cm 土层差异表现为极显著,充分说明间作模式下团聚稳定性优于单作模式。且以上指标在 0—10 cm 土层内差异最显著,随土层深度增加差异呈减小趋势;通过相关性分析,团聚体破坏率与根体积,根尖数呈显著负相关,与根长,根表面积,根长密度,根权数极显著相关,说明根长、根长密度、根表面积和根权对提高团聚体稳定性具有一定作用。因此,间作模式可通过增大根表面积、根长等改变根系特征,从而提高土壤团聚体稳定性。

关键词:坡耕地; 间作; 根系特征; 团聚体稳定性; 分形维数

中图分类号: S157.4⁺31

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)01-0124-06

Relationship Between Root Characteristics and Aggregate stability in the Field With Maize and Soybean Intercropping

BAI Lushun, FAN Maopan, WANG Zilin, WANG Ting, DENG Chao, LI Yongmei

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

Abstract: The field experiment with three planting patterns, including maize monoculture, soybean monoculture, and maize and soybean intercropping, was carried out to study the effects of crop root on soil aggregate stability. Root density, root length, root surface area and other root characteristics in 0—10 cm, 10—20 cm and 20—30 cm soil layers were analyzed under different planting patterns by WINRHIZO. The stability of soil aggregates in each soil layer was analyzed by wet sieve method. The results showed that the root characteristic indexes of all three planting patterns decreased with the increase of soil depth; in 0—10 cm soil layer, the root density and root volume of intercropping were 14.79% and 11.74% higher than those of monocultures, respectively; mean weight diameter (MWD) and geometric diameter (GMD) in each soil layer were higher in intercropping pattern than those in monocultures, while percentage of aggregate destruction (PAD), soil erodibility (K), fractal dimension (D) were lower, especially in 0—10 cm, indicating that structure soil aggregates were more stable in intercropping pattern; the correlation analysis showed that PAD was significantly negatively correlated with root volume and root tip numbers, extremely significantly correlated with root length, root surface area, root length density, and root branch number. These results indicated that root length, root length density, root surface area and root branch number may improve soil aggregate stability. It is concluded that intercropping can significantly improve the root surface area, root length and so on, and thus improve the stability of soil aggregates.

Keywords: slope farmland; intercropping; root characteristics; aggregate stability; fractal dimension

云南省地貌类型属典型的山地结构,山区面积占全省面积的94%,耕地以坡耕地为主,占全省耕地面积的74%。种植模式以顺坡种植为主,水土流失严重,全省水土流失面积约7万km²,严重制约了农业经济发展。因此,改善土壤结构,提高土壤团聚体稳定性,提高土壤抗蚀性,减少水土流失,已经成为云南省农业发展的关键^[1]。

土壤团聚体作为土壤无机颗粒和有机物在土壤成分的参与下形成的具有不同尺度的多孔结构单元,不仅是土壤基本结构单元,也是土壤结构稳定性的基本物质基础^[2]。其数量和特征对土壤结构,透水性以及微生物活动有重要影响^[3]。土壤团聚体结构稳定性与土壤抗蚀性有着密切的关系^[4-5]。因此,土壤团聚体稳定性成为衡量土壤抗蚀性的一个重要指标^[6]。一般来说,衡量土壤团聚体稳定性的指标主要有平均重量直径,平均几何直径,可蚀性因子和分形维数等^[7]。其中,平均几何直径和平均重量直径均和团聚体稳定性呈正比,而分形维数和可蚀性因子均与团聚体稳定性呈反比^[8-9]。而以上指标变化通常和作物根系有着密切联系。

根系一方面通过在土壤中交叉,缠绕等作用固结土壤,另一方面,通过根系作用改善土壤环境促进团聚体的形成,提高其稳定性^[10]。发达的根系往往有利于大团聚体的形成。根系特征不同往往会造成团聚体稳定性的差异。目前主要根系特征指标主要有根长,含根量,根表面积等。有研究表明,根系特征中根长和根表面积对提高团聚体稳定性作用较大,且直径<1 mm的须根效果较明显^[11-12]。但关于根系和团聚体稳定性研究多集中于林业和草业方面,对于农作物研究,也主要集中于黄土和紫色土,对于坡耕地红壤研究较少,同时也缺乏对团聚体形态结构的研究^[13]。因此,本次试验通过研究作物不同种植模式下根系特征和团聚体结构特征以及两者之间的相关性,进一步探究不同种植模式对坡耕地红壤结构稳定性的影响,选择最优种植模式,为提高土壤可蚀性,减少坡耕地水土流失提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于云南省昆明市盘龙区松华坝水源保护区的上甘沟村。该地中心地理坐标为25°02'28"N, 102°58'39.7"E,坡度为10°,海拔2 234 m,年均温为4.1~20.8℃,平均无霜期250~365 d,平均降雨量

900~1 000 mm,属亚热带季风气候。供试土壤为山原红壤,基本理化性质为pH:6.01,有机质含量为36.50 g/kg,全氮含量为8 g/kg,碱解氮为104.50 mg/kg,速效磷含量5.75 mg/kg,速效钾含量87.17 mg/kg。

1.2 试验材料

供试作物:大豆品种为滇杂七号,为云南农业大学农学院选育的优质品种;玉米为宝玉七号,为在当地种植最多的品种。玉米和大豆生长周期为100 d左右;供试肥料:农田所施常规肥料,多酶金尿素含N≥46.20%,过磷酸钙含P₂O₅≥16.00%,农用硫酸钾含K₂O≥51.00%。

1.3 试验方法

1.3.1 小区设计 试验小区长10 m,宽4 m,小区面积40 m²。玉米单作,大豆单作,玉米间作大豆3个处理,每个处理重复3次,共计9个小区,随机分组排列在10°的坡面上。

1.3.2 种植模式 玉米和大豆的种植模式参考当地的种植习惯,玉米单作为宽窄行种植,大行距80 cm,小行距40 cm,株距30 cm,种植密度55 778株/hm²;大豆单作采用等行距种植模式,行距40 cm,株距25 cm,种植密度201 302株/hm²;玉米大豆间作采用2:2模式间作,玉米与玉米小行距40 cm,大行距155 cm,玉米大豆间距40 cm,大豆之间35 cm,玉米株距为25,大豆株距为20,玉米种植密度为51 729株/hm²,大豆种植密度为129 258株/hm²。其中玉米每穴播种2粒,大豆每穴4粒,后期进行除苗,玉米每穴留1株,大豆每穴留2株。

按当地常规施肥水平进行施肥。大豆施N 45 kg/hm²,P₂O₅ 85 kg/hm²和K₂O 55 kg/hm²,均以基肥形式穴施;玉米施N 225 kg/hm²,P₂O₅ 85 kg/hm²和K₂O 85 kg/hm²,其中施肥方式均为穴施,氮肥分三次施入,分别为基肥、小喇叭口期追肥和大喇叭口期,分别占总施氮肥量35%,30%,35%,磷和钾肥全部作为基肥穴施。在作物整个生长期根据具体情况进行除草,浇水等田间管理工作。

1.3.3 样品采集 玉米、大豆成熟期进行样品的采集。选取每个小区具有代表性的3株植株,以植株为中心放置采样器(30 cm×30 cm×10 cm),采用全挖法采集以植株为中心30 cm以内的根系和土壤样品,采样深度分别为0—10 cm,10—20 cm和20—30 cm,分别将根系、土壤样品带回实验室进行分析测定。

1.4 研究方法

1.4.1 团聚体测定方法 土壤团聚体采用干筛法和

湿筛法^[14]。测定>5 mm,2~5 mm,1~2 mm,0.5~1 mm,0.25~0.5 mm,<0.25 mm,6 个粒级团聚体质量。

1.4.2 根系特征测定方法 将采集的根系置于孔径为 0.5 mm 的铜筛中用水洗净,洗净后使用 EPSON 4 900 扫描仪进行扫描,然后使用 WINRHIZO 根系分析软件对扫描后的图像进行分析。根系扫描完成后将根系置于烘箱中 105℃ 烘至恒重,然后使用 1/100 电子天平进行称重,计算根系密度。

1.4.3 指标计算 团聚体破坏率(PAD)用以下公式计算^[15]:

$$(\text{PAD})=\frac{>0.25\text{ mm 团聚体(干筛-湿筛)}}{>0.25\text{ mm 团聚体(干筛)}}$$

平均重量直径(MWD)用以下公式计算^[15]:

$$\text{MWD}=\frac{\sum R_i W_i}{\sum W_i}$$

式中: R_i 为某粒级团聚体平均直径; W_i 为湿筛后某粒级团聚体的重量。

几何直径(GMD)用以下公式计算:

$$\text{GMD}=\exp \frac{\sum W_i \ln R_i}{\sum W_i}$$

可蚀性因子 K 用以下公式计算^[16]

$$K=7.954 \times\{0.0017+0.0494 \times \exp [-0.5 \times$$

$$\left(\frac{\lg \text{GMD}+1.675}{0.6986}\right)^2\}$$

土壤团聚体分形维数(D)的计算采用以下公式:^[17]

$$M(x<X) / M_i=(x / X_L)^{3-D}$$

式中: x 表示土粒直径; $M(x<M)$ 表示直径小于的积累土粒质量; M_i 表示各级土壤质量的总和; X_L 为土粒最大粒径; D 表示分形维数。

1.4.4 数据分析 用 Excel 制作图表,用 SPSS 进行回归分析,单因素方差分析较等统计分析方法。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式下作物根系特征

通过对单间作玉米、大豆根系的采集与测定分析(表 1),单间作条件下,玉米和大豆的根系密度、根长、根表面积、根长密度、根体积等随着土层深度的增加而呈减少的趋势,而根系主要集中在 0—10 cm 土层。单作条件下,相同土层深度,玉米的根系密度、根长、根长密度、根体积高于大豆。单间作条件下,间作根系密度、根体积在 0—10 cm 土层分别比单作增加了 14.79% 和 11.74%,同时间作条件下增加了根长和根长密度。根表面积在 10—20 cm 土层,间作比单作增加 43.85%。

表 1 不同种植模式下作物根系特征

种植模式	土层深度/cm	根密度/ (g·m ⁻³)	根长/ mm	根表 面积/cm ²	根长密度/ (cm·m ⁻³)	根体积/ cm ³	根尖数/ 个	根杈数/ 个
玉米单作	0—10	2155.56	1143.26	487.98	12702.93	6.43	7599	6294
	10—20	446.67	884.51	239.03	9827.85	2.96	4022	3018
	20—30	145.56	247.04	68.62	2744.93	1.12	941	418
大豆单作	0—10	1184.44	1046.30	444.33	11625.56	6.01	8444	5172
	10—20	164.44	632.56	177.80	7028.41	1.55	7642	3124
	20—30	73.33	140.57	52.06	1561.85	0.59	922	512
玉米//大豆	0—10	3833.89	2300.81	913.60	25564.59	13.90	9552	7931
	10—20	566.67	1562.21	599.63	17357.85	3.87	9144	5707
	20—30	157.78	292.48	123.21	3249.78	1.26	1988	1170

2.2 不同模式水稳性团聚体分布及破坏率分析

由表 2 可以看出,玉米在 3 个不同深度土层中水稳性团聚体含量分别为 64.63%,60.97%,57.2%,大豆不同深度水稳性团聚体含量分别为 70.5%,66.05%,60.27%。在不同深度土层间作模式水稳性团聚体含量均显著大于单作。在 0—10 cm 深度的土层中,间作模式中直径>5 mm,2~5 mm,1~2 mm,0.5~1 mm 水稳性团聚体含量较玉米单作模式提高了 59.45%,45.41%,18.1%,4.05%,;较大豆单作模式提高了 35.15%,18.78%,8.85%,1.16%。在 10—20 cm 深度的土层中,间作模式中 4 个粒径水稳性团聚体含量

较玉米提高了 37.71%,117.75%,24.78%,18.15%;较大豆单作模式提高了 25.19%,10.19%,11.81%,6.78%。在 20—30 cm 深度的土层中,间作模式中 4 个粒径水稳性团聚体含量较玉米提高了 21.78%,34.86%,29.11%,8.1%;较大豆单作模式提高了 29.32%,6.34%,11.56%,4.25%。

从表 3 可以看出,玉米和大豆在 0—10 cm 土层团聚体破坏率分别为 31.96% 和 23.94%,两种作物团聚体破坏率均随深度增加而增加,间作模式不同深度团聚体破坏率显著低于两种单作模式,其中在 0—10 cm 内较玉米和大豆分别降低了 44.56% 和

25.98%;在 10—20 cm 内分别降低了 41.25%和 22.86%;在 20—30 cm 内分别降低了 19.9%和 8.32%。每个深度差异性均达到显著水平。

2.3 不同模式土壤可蚀性分析

可蚀性因子 K 是衡量土壤抵抗水侵蚀能力大小的一个综合指标, K 值大小与土壤抗侵蚀能力成反比^[18]。从图 1 可以看出,玉米和大豆 K 值在 0—10 cm 土层最

小,分别为 0.104,0.099。在不同深度土层的 K 值均表现为间作模式<大豆单作<玉米单作。在 0—10 cm 土层中间作中 K 值较玉米、大豆单作分别降低 23.93%和 19.56%,在 10—20 cm 土层中较玉米、大豆单作分别降低 14.29%和 7.2%,在 20—30 cm 土层中较玉米、大豆单作分别降低 10.23%和 3.67%。其中在 0—10 cm 土层间作提高土壤抗蚀性效果最显著。

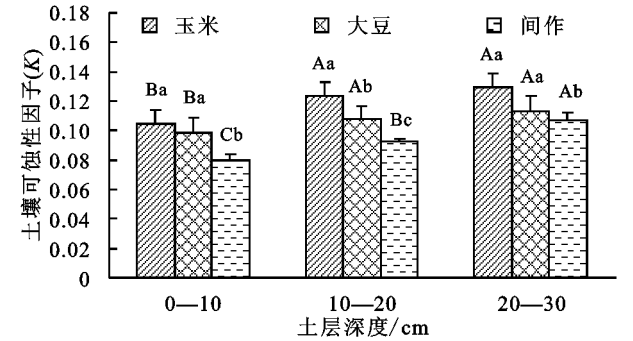
表 2 不同种植模式水稳性团聚体含量 %

种植模式	深度/cm	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
玉米单作	0—10	5.45±0.42	10.35±1.51	10.94±0.06	17.55±0.48	20.35±0.91	35.37±2.11
	10—20	4.8±0.26	8.45±1.28	10.09±1.15	16.8±0.89	20.83±0.36	39.03±2.28
	20—30	3.26±0.92	8.09±0.09	9.79±1.03	16.79±0.81	19.27±2.87	42.8±2.08
大豆单作	0—10	6.43±0.81	12.67±1.04	11.87±0.11	18.05±1.77	21.49±3.1	29.5±3.31
	10—20	5.28±0.4	9.03±1.22	11.26±0.85	18.59±1.96	21.89±1.24	33.95±3.09
	20—30	3.07±1.22	10.26±1.65	11.33±0.88	17.41±1.76	18.21±3.19	39.73±1.84
大豆/玉米单作	0—10	8.69±0.61	15.05±1.55	12.92±0.58	18.26±0.14	19.9±0.41	25.19±2.9
	10—20	6.61±1.02	9.95±0.42	12.59±1.22	19.85±1.8	22.65±0.42	28.35±3.96
	20—30	3.97±0.6	10.91±0.5	12.64±1.59	18.15±1.41	18.25±2.07	36.09±1.12

表 3 不同种植模式团聚体破坏率 %

深度(cm)	玉米单作	大豆单作	玉米大豆间作
0—10	31.96±2.44Ba	23.94±1.33Bb	17.72±1.29Bc
10—20	33.02±3.22Ba	25.15±1.33Bb	19.4±1.86Bc
20—30	37.69±0.76Aa	32.93±0.77Ab	30.19±1.59Ac

注:表中不同大写字母表示某一种种植模式不同深度土层团聚体破坏率存在显著差异,表中不同小写字母表示不同种植模式相同深度土层团聚体破坏率存在显著差异($p<0.05$)。



注:不同的大写字母表示同一种种植模式不同土层深度间差异显著,不同的小写字母表示不同种植模式相同土层深度间差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同种植模式土壤可蚀性因子 K

2.4 不同模式下团聚体直径分析

平均重量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)是反映团聚体大小和分布的情况的常用指标,两者越大表示团聚体稳定性越强^[15]。从图 2 和图 3 可以看出,玉米单作模式平均重量直径和平均几何直径分别为 0.888~1.095,0.559~0.621;大豆单作模式平均重量直径和平均几何直径分别为 0.974~1.249,0.559~0.637,而间作模式下 MWD 和 GMD 均明显大于两种单作模式,均表现为间作模式>大豆单作>

玉米单作,且与两种单作模式差异显著。间作模式在 0—10 cm 的 MWD 较玉米单作,大豆单作分别增长 32.83%和 16.45%,在 10—20 cm,较玉米、大豆单作分别增长 19.4%和 11.69%;在 20—30 cm,较玉米、大豆单作分别增长 19.37%和 9.36%。间作模式在 0—10 cm 的 GMD 较玉米单作,大豆单作分别增长 13.14%和 10.22%,在 10—20 cm,较玉米、大豆单作分别增长 14.39%和 7.19%;在 20—30 cm,较玉米、大豆单作分别增长 10.23%和 3.67%。

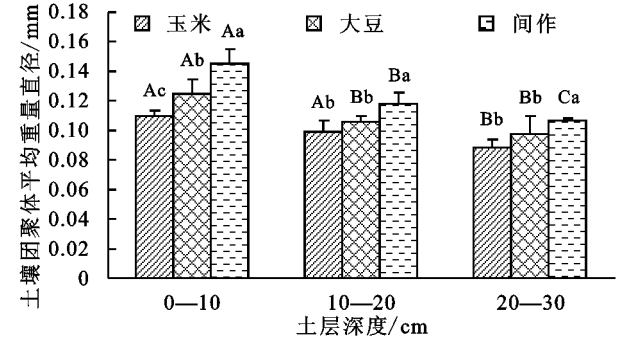


图 2 不同种植模式下土壤团聚体平均重量直径(MWD)

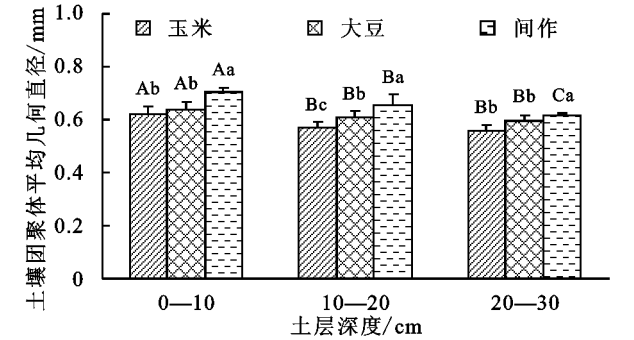


图 3 不同种植模式下土壤团聚体平均几何直径(GMD)

2.5 不同模式土壤团聚体分形维数分析

土壤团聚体分形维数(D)是反映团聚体稳定性的重要参数,其在一定程度上反映出土壤的结构特征,能反映各个粒级水稳性团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势, D 值越小,土壤团聚体稳定性越好,土壤抗侵蚀能力越强^[19]从图 4 可以看出,玉米单作和大豆单作分形维数均在 0—10 cm 土层取的最小值,分别为 2.56,2.46,而间作模式下不同土层分形维数(D)显著低于大豆、玉米单作模式,且差异显著。其中,在 0—10 cm 土层内效果最明显,较玉米单作和大豆单作,间作模式的分形维数分别降低了 8.98%和 5.28%。随着深度增加,每种模式分形维数都呈增长趋势。随着土层深度增加,土壤结构稳定性呈降低趋势。

2.6 作物根系特征与团聚体稳定性之间关系

团聚体破坏率是衡量土壤团聚体稳定性的常用

表 4 作物根系特征与团聚体破坏率之间相关性

种植模式	根系密度	根长	根表面积	根长密度	根体积	根尖数	根权数
玉米单作	-0.579	-0.905**	-0.82**	-0.905**	-0.751*	-0.755*	-0.804**
大豆单作	-0.65	-0.862**	-0.815**	-0.862**	-0.749*	-0.929*	-0.91**
玉米//大豆	-0.666	-0.929**	-0.903**	-0.929**	-0.731*	-0.917*	-0.935**

注:* 和 ** 分别表示在 0.05,0.01 水平上显著相关。

3 讨论

有结果分析可知,与单作模式相比,间作模式下根系参数得到了提高,说明间作模式有效的改善了根系形态。其中根长和根密度提升最明显,可能是由于间作模式种植密度相对较小,而使根系有了更大的生长空间,促进根系的伸展。其中在浅层土壤根密度和根体积提升较明显,深层土壤根尖数增加较明显。

团聚体作为土壤重要结构单元,其组成和稳定性常常用来衡量土壤抗蚀性的重要指标。通过对水稳性团聚体分析发现,间作模式可以显著提高较大粒级水稳性团聚体(1~5 mm)含量,是由于间作模式作物根系较为发达,通过其缠绕,固结作用使土壤更容易形成较大粒级的团聚体。其中对>2 mm 团聚体提高效果最明显,可能是因为根系形态特征更容易促进该粒级团聚体的形成。通过对团聚体破坏率,团聚体平均直径,抗蚀性因子等团聚体稳定性指标分析,发现间作模式以上指标均显著优于单作模式,说明间作模式团聚体稳定性优于单作模式,且具备表现为 0—10 cm 土层效果最明显,除了间作模式发达的根系,有着较大表面积和较长的根系,能更好的缠绕土壤,还可能是由于发达的根系会产生更多的分泌物,使团

指标,可以一定程度上体现团聚体的稳定性,所以通过分析团聚体破坏率和根系指标相关性来表现根系和土壤团聚体稳定性间的关系。如表 4 所示,团聚体破坏率和根系密度、根长、根表面积、根长密度、根体积、根尖数、根权数均达到了显著相关水平($p<0.05$),其中和根表面积、根长和根长密度,根权数达到了极显著负相关水平($p<0.01$)。

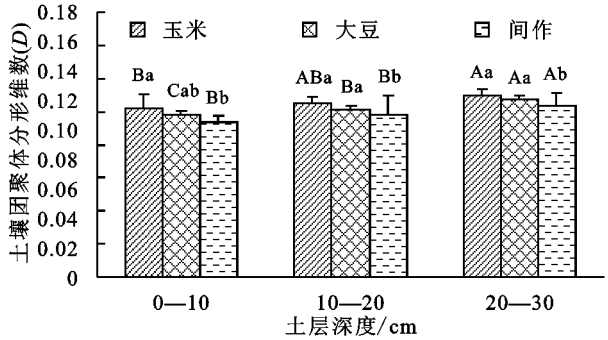


图 4 不同种植模式下土壤团聚体分形维数

聚体结构更稳定。此外,根系分泌物也可以提高根际微生物活力,而一些真菌通过菌丝缠绕和分泌多糖等物质对提高团聚体稳定性也会产生巨大作用^[20]。

有研究表明,植物发达的根系能提高土壤团聚体稳定性,但根系各种指标对团聚体形成和稳定性影响有一定差异性,孙一惠对金丝柳和毛白杨根系研究中发现直径<1 mm 根系对团聚体稳定性影响最大^[16],吕刚在不同植物根系与土壤团聚体关系研究中发现团聚体和根长、根表面积相关性最高^[11]。本次试验通过根系指标和团聚体破坏率分析发现,与根长,根表面积,根长密度和根权数相关度最高,和吕刚研究相似。说明根权数,根长密度,根长和根表面积对提高团聚体稳定性贡献更大。是因为较长的根系可以通过自身的固结作用可以更好地促进团粒结构的形成,较大的根表面积能增加根系对土壤的作用面积,而根权数的增加能更好的形成网状根系,能更好的固结土壤。除此之外,根系比表面积的增加可能也会更好的增加根系分泌物的增加,间接增加了水稳性团聚体的含量。

4 结论

(1) 单间作条件下,玉米和大豆的根系密度、根

长、根表面积、根长密度、根体积等随着土层深度的增加而呈减少的趋势,而根系主要集中在0—10 cm土层。间作根系密度、根体积在0—10 cm土层分别比单作增加了14.79%和11.74%,同时间作条件下增加了根长、根表面积和根长密度。

(2) 通过对水稳性团聚体含量分析,发现间作模式可以显著提高水稳性大团聚体(1~5 mm)含量,在0—10 cm土层深度效果最明显,随深度增加间作优势减弱,其中对>2 mm团聚体提高效果最明显。

(3) 对团聚体稳定性分析发现,间作模式下各团聚体稳定性指标均优于单作模式,说明间作模式下土壤团聚体稳定性明显强于单作模式,且均表现为在0—10 cm土层效果最明显,其中,团聚体破坏率:间作<大豆单作<玉米单作,间作较玉米、大豆分别降低了44.56%和25.98%;抗蚀性因子K也表现为间作<大豆单作<玉米单作,间作较玉米、大豆分别降低了23.93%和19.56%;平均直径分析结果表明间作模式团聚体稳定性均显著优于单作模式,且随身度增加效果减弱;对分形维数研究发现,间作<大豆单作<玉米单作,说明间作模式下不同粒径的土壤团聚分布更合理,土壤整体结构更稳定。

(4) 通过团聚体和根系指标相关性分析,发现团聚体稳定性与根体积,根尖数显著相关,与根长,根表面积,根长密度和根权数极显著相关,研究表明根长密度,根长和根表面积对提高团聚体稳定性贡献更大。

参考文献:

- [1] 杜静,范茂攀,王自林,等. 玉米—马铃薯间作根系特征及其与坡耕地红壤径流养分流失的关系[J]. 水土保持学报,2017,31(1):55-60.
- [2] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels[J]. Catena, 2002,47(2):133-149.
- [3] Rachman A, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Influence of long-term cropping systems on soil physical properties related to soil erodibility[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(2):637-644.
- [4] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究,2002,9(1):81-85.
- [5] 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [6] Chen J J, He B H, Wang X Y, et al. The effects of herba and rographitis hedgerows on soil erodibility and fractal features on sloping cropland in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013,20(1):7063-7070.
- [7] 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.
- [8] 祁迎春,王益权,刘军,等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报,2011,27(1):340-347.
- [9] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- [10] 韩凤朋,郑纪勇,张兴昌. 黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(2):50-55.
- [11] 吕刚,魏忠平,高英旭,等. 不同土地利用类型植物根系与土壤抗蚀性关系研究[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(2):111-115.
- [12] 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.
- [13] 马志鹏,范茂攀,陈小强,等. 间作模式下作物根系与坡耕地红壤抗蚀性的关系[J]. 水土保持学报,2016,30(4):68-73.
- [14] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学,2014,35(12):4696-4704.
- [15] 王小红,杨智杰,刘小飞,等. 天然林转换成人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(6):177-182.
- [16] 孙一惠,马岚,张栋,等. 2种扦插护岸植物根系对土壤结构的改良效应[J]. 北京林业大学学报,2017,39(7):54-61.
- [17] 郑子成,李廷轩,张锡洲,等. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J]. 水土保持学报,2009,23(5):228-231.
- [18] 由政,姚旭,景航,等. 不同演替阶段群落根系分布与土壤团聚体特征的协同变化[J]. 水土保持研究,2016,23(6):20-25.
- [19] 祁迎春,王益权,刘军,等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报,2011,27(1):340-347.
- [20] 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.