

# 大豆单间作对土壤团聚体及固土能力的影响

邓超, 李永梅, 范茂攀, 王梦雪

(云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650201)

**摘要:**为研究红壤坡耕地上大豆单间作模式对土壤团聚体和固土能力的影响,选用大豆单作、大豆玉米间作两种模式,研究了不同种植模式中土壤含水率、土壤团聚体、大豆根系和固土能力的特征。结果表明:大豆成熟期土壤含水率在 10°坡上间作比单作高 0.32%, 20°坡上间作比单作高 4.06%, 30°坡上间作比单作低 3.81%;大豆玉米间作与大豆单作相比, >0.25 mm 稳定性团聚体在 10°和 30°坡分别增加了 6.61%, 2.63%, 在 20°坡减少了 4.46%;平均重量直径间作后在 10°和 30°坡分别增加了 32.84%, 9.09%, 在 20°坡减少了 89.87%;分形维数在 10°, 20°坡上分别增加了 2.85%, 3%, 30°坡无差异;固土能力在 10°, 30°坡上间作高于单作, 20°坡上间作低于单作。大豆间作根系指标均单作有降低趋势。10°坡耕地单间作模式根系指标无显著差异时,大豆间作的土壤团聚体分形维数增加,固土能力高于单作。20°坡耕地大豆间作根体积显著降低,固土能力低于单作。30°坡耕地大豆单间作根系指标和分形维数都无显著差异或趋势时,间作的分形维数影响强于单作,间作固土能力高于单作。综上所述,大豆间作对根土复合体固土能力主要受根系的影响,同时间作在坡耕地能增强土壤团聚体分形维数的作用,增加根土复合体固土能力。

**关键词:**间作; 土壤团聚体; 根系特征; 固土能力

**中图分类号:** S152.4; S157.3<sup>+</sup>9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2020)02-0077-07

## Effects of Different Planting Patterns of Soybean on Soil Aggregates and Soil Consolidation Ability

DENG Chao, LI Yongmei, FAN Maopan, WANG Mengxue

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

**Abstract:** To study the effects of different planting patterns of soybean on soil aggregates and soil consolidation ability in the red soil sloping land, the soybean monoculture and soybean-maize intercropping were taken as the planting patterns. The characteristics of soil moisture content, soil aggregates, soybean root system and soil consolidation ability were investigated in two cropping patterns. The results showed that in the maturity period of soybean, soil moisture content in intercropping pattern was 0.32% higher than that of monoculture on the slope with 10°, soil moisture content in intercropping pattern was 4.06% higher than that of monoculture on slope with 20°, and 3.81% lower than that of monoculture on 30° slope; compared with those in monoculture, >0.25 mm stable aggregates of intercropping pattern increased by 6.61%, 2.63% on slopes with 10° and 30°, respectively, and decreased by 4.46% on slope with 20°, mean weight diameter of intercropping pattern increased by 32.84% and 9.09% on the slopes with 10° and 30°, respectively, decreased by 89.87% on slope with 20°, and the fractal dimensions of intercropping pattern increased by 2.85% and 3% on the slopes with 10° and 20°, respectively, and there was no difference on the slope with 30°; the soil consolidation ability of intercropping on the slopes with 10° and 30° was higher than that of monocropping, but that of intercropping on the slope with 20° was lower than that of monocropping; the root characteristics of soybean intercropping had no significant difference with single cropping on slope with 10°; the fractal dimension of soil aggregates in soybean intercropping increased, and the soil consolidation ability of soybean inter-

收稿日期: 2019-04-14

修回日期: 2019-05-06

资助项目: 国家自然科学基金(41661063, 41461059); 云南农业大学学生科技创新创业行动基金(2018ZKY264)

第一作者: 邓超(1993—), 男, 重庆人, 在读硕士研究生, 研究方向为植物营养学。E-mail: tengchao1257@foxmail.com

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

cropping was higher than that of single cropping; in sloping arable land with  $20^\circ$ , the root volume of soybean intercropping decreased significantly, and the soil consolidation ability of soybean intercropping was lower than that of single cropping; there was no significant difference or trend in root characteristics and fractal dimension of soybean planting patterns in sloping farmland with  $30^\circ$ , the effect on soil consolidation ability of fractal dimension of soybean intercropping was stronger than that of single cropping, and the soil consolidation ability of intercropping was higher than that of single cropping. In summary, soybean intercropping has the major effect on the soil consolidation capacity of root-soil complexes by root. At the same time, soybean intercropping can enhance the effect of fractal dimension of soil aggregates and increase the soil consolidation capacity of root-soil complexes in sloping farmland.

**Keywords:** intercropping; soil aggregates; root characteristics; soil consolidation ability

坡耕地是云南省重要的耕地资源,根据全国第二次土地调查数据<sup>[1]</sup>,云南省耕地面积 624.39 万  $\text{hm}^2$ ,其中坡耕地占总耕地的 73.97%。红壤坡耕地的土壤酸化、粘重板结、肥力低下,水土流失等问题严重,限制了坡耕地上农业的发展<sup>[2]</sup>。在红壤坡耕地上不合理种植耕作,会造成更大面积的水土流失,损害生产力,对区域经济的发展和地方环境保护产生重大威胁。植物根系对于土壤固土能力的增强作用已有大量研究<sup>[3-5]</sup>,根系的固土力学<sup>[6]</sup>研究主要有单根抗拉和群根剪切两个方面的研究方式,其中单根抗拉是通过拉伸试验,测定单根的材料力学特性,群根剪切是通过外部剪切根土复合体,测定整体的抗剪强度。根系的固土能力是通过原位水平抗拉试验,测定群根共同作用固持土壤的能力。毛妍婷等<sup>[7-8]</sup>从植物根系固土力学角度分析评价了作物和草本植物根系的固土能力,用载荷位移之间关系曲线代表根系本身抗拉特性与土壤力学特征间的相互作用,证明了油菜、狗尾草可以增加土壤固土能力。不同植物的根系密度越大<sup>[9-10]</sup>,固土能力越强,间作可以通过增加作物根系密度来提高固土能力<sup>[11-12]</sup>。郑朝元等<sup>[9]</sup>对于深层较浅层具有更高固土能力的研究,进一步考虑了固土能力与土壤间的关系。有研究表明,间作可以增加土壤稳定性团聚体<sup>[13]</sup>,增加作物的根系<sup>[14]</sup>,减少水土流失。稳定性土壤团聚体增加,土壤抗侵蚀能力增强。王润泽等<sup>[15]</sup>研究发现在紫色土区植物篱可以增加土壤稳定性团聚体。黄俊等<sup>[16]</sup>在红壤上发现根系生物量增加可以促进土壤有机质的积累,提高土壤团聚体的稳定性。前人研究多集中在根系、土层和种植模式对固土能力的影响,代表土壤结构特征和抗侵蚀能力的团聚体与固土能力的关系研究鲜见报道。

目前,云南省水土流失面积 12.06 万  $\text{km}^2$ ,占全省国土总面积的 31.46%<sup>[17]</sup>。因此,坡耕地的水土保持对云南农业发展尤为重要。因此,本研究选用云南省较普遍的大豆—玉米间作为研究对象,测定大豆间

作玉米、大豆单作在作物成熟期根土复合体 0—10 cm 土层固土能力,和相应的土壤含水率、作物根系和土壤团聚体等指标,分析土壤含水率、作物根系、土壤团聚体和固土能力之间的关系,探讨大豆在单作、间作玉米时对土壤团聚体特征和固土能力的影响,为间作保护坡耕地土壤的可持续利用和改善土壤结构的应用推广提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概述

试验于 2018 年 3—9 月在云南农业大学后山径流试验小区进行( $25^\circ 8' 18''\text{N}$ ,  $102^\circ 45' 58''\text{E}$ ),海拔为 1 950 m,坡向为北偏西  $57^\circ$ ,周年气温为  $4.7\sim 23.7^\circ\text{C}$ ,年平均降雨量为 960 mm,是云南省典型的坡耕地红壤水土流失区。供试土壤为红壤,土壤基本理化性质如下:有机质为 36.41 g/kg, pH 值为 6.73,碱解氮为 112.98 mg/kg,速效磷为 5.51 mg/kg,速效钾为 89.27 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验设有  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  共 3 组坡度,每组坡度设置一个大豆单作,一个大豆—玉米间作 2 个小区,小区面积按坡度顺序分别为  $4\text{ m}\times 10\text{ m}$ ,  $4\text{ m}\times 7\text{ m}$ ,  $4\text{ m}\times 6\text{ m}$ 。坡耕地上分单间作种植。供试作物大豆为豆单一号,生长期为 120 d 左右;玉米为云瑞 88,生长期也为 120 d 左右。大豆单作采用等行距种植,株行距  $25\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ ,共计 17 行,每行 16 株。大豆—玉米间作采用 2:2 种植模式,大豆、玉米行内株行距都为  $30\text{ cm}\times 40\text{ cm}$ ,玉米与大豆间行距 50 cm,共计玉米 12 行,每行 13 株,大豆 11 行,每行 13 株。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。根据试验小区的具体情况在玉米和大豆的整个生育期内进行相应的浇水、除草等农事活动。

### 1.3 测定项目与测定方法

1.3.1 土壤含水率和土壤团聚体 采用环刀法测定深度 0—10 cm 土壤含水率。土壤团聚体则是将采回

的土样去除石块风干后过 5, 2, 1, 0.5, 0.25 mm 的套筛, 筛分之后, 根据相应粒级称重再计算各粒径干筛团聚体所占样品比重, 配出 50 g 土样用于湿筛。湿筛时, 将土样置于 2 mm 筛上, 加水浸没至套筛振动至最高点时土样不会露出水面, 上下振荡 15 min, 按顺序收集至铝盒中, 60℃ 下烘干称重。最后得到 > 2 mm, 1~2 mm, 0.5~1 mm, 0.25~0.5 mm, 0.106~0.25 mm, < 0.106 mm 的湿筛团聚体。用湿筛后的土壤团聚体计算 > 0.25 mm 稳定性团聚体 ( $R_{0.25}$ )、平均重量直径 (MWD) 和分形维数 ( $D$ ), 所用计算公式<sup>[18]</sup>如下:

$$R_{0.25} = \sum_{n=1}^i W_n \quad (1)$$

$$\text{MWD} = \sum_{n=1}^i (\bar{d}_n \times W_n) \quad (2)$$

式中:  $\bar{d}_n$  为某级团聚体的平均直径 (mm);  $W_n$  为某级团聚体质量百分比 (%)。

$$\frac{M_{d < \bar{d}_i}}{M} = \left( \frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (3)$$

式中:  $\bar{d}_i$  为某团聚体平均直径 (mm);  $M_{d < \bar{d}_i}$  为粒径小于  $\bar{d}_i$  的团聚体的质量 (g);  $M$  为团聚体总质量 (g);  $d_{\max}$  为团聚体的最大粒径 (mm)。利用公式 (3), 通过数据线性拟合, 可求出分形维数  $D$ 。

**1.3.2 固土能力** 测定仪器为农作物根土复合体固土力学原位测定仪<sup>[19]</sup>, 其中 ML-20 型锚杆拉力计, 可以产生 200 kN 额定载荷, 浙江省土工仪器制造有限公司制造。剪切箱制作所用钢板的厚度为 1.0 cm, 大小规格是: 长×宽×高=30 cm×30 cm×10 cm。剪切箱与拉力计油缸接触面积为 94.2 cm<sup>2</sup>。拉力计上安装压强表, 精度为 0.05 MPa, 上海名字仪表有限公司制造, 测定固土能力。剪切箱上用直尺测定土壤样方位移, 以观测在拉力推动下根土复合体的位移量。

大豆成熟期时, 在 0—10 cm 土层采用农作物根土复合体固土力学原位测定仪选取大豆植株根系横坡等高度进行原位固土拉力测定, 每个处理重复测定 3 次。用压强公式计算载荷, 再以  $F-S$  曲线来反映各样方所受载荷 ( $F$ ) 与位移 ( $S$ ) 间的关系 (图 1), 通过线性特征可以得知样方中根土复合体的固土能力, 通过肉眼观察  $F-S$  曲线的拐点得到比例极限点 ( $F_1$ )、屈服拉力点 ( $F_2$ )、抗拉极限点 ( $F_3$ ) 3 个载荷临界点。比例极限点 ( $F_1$ ) 代表根系弹性形变量和土壤弹性形变量的明显位移阶段的临界点, 此阶段撤销外力根土能恢复原样; 屈服拉力点 ( $F_2$ ) 是在塑性形变阶段开始临界点, 此阶段根系密度越大所需载荷就大; 抗拉极限点 ( $F_3$ ) 是载荷和位移在这阶段达

到稳定增长的阶段的临界点, 即经塑性形变后, 土体分离, 根系彻底松动阶段<sup>[4]</sup>; 破坏拉力点 ( $F_4$ ) 是根系完全被破坏的理论意义上的一个点, 对固土能力没有实际意义。

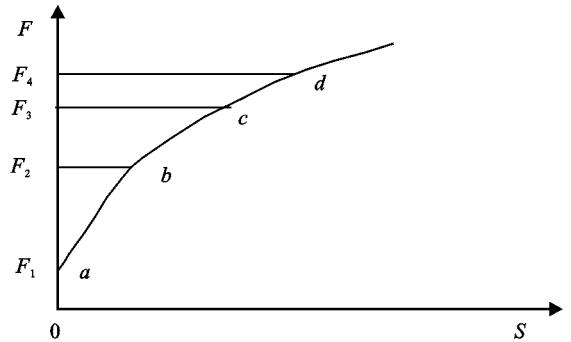


图 1  $F-S$  曲线及载荷临界点示意图

**1.3.3 根系特征** 测定完固土拉力后收集剪切箱内所含根系, 带回实验室清洗干净后, 用镊子分离成个体平铺于有机玻璃盒内, 用 EPSONV800 扫描仪扫描根系形态, WINRHIZO 软件对根系扫描图像分析总根长和根表面积, 结合样方土壤体积计算根长密度。

## 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据的整理、图表的制作, SPSS 20 进行相关性分析, DPSv 7.05 软件进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植模式土壤含水率

由图 2 可以看出, 各坡度单间作模式间土壤含水率无显著差异, 但是土壤含水率均随坡度增加而呈降低趋势。10°坡上间作比单作高 0.32%, 20°坡上间作比单作高 4.06%, 30°坡上间作比单作低 3.81%。同一坡度下含水率差异不显著, 在同一坡度下讨论单间作模式的差异可以排除含水率影响。

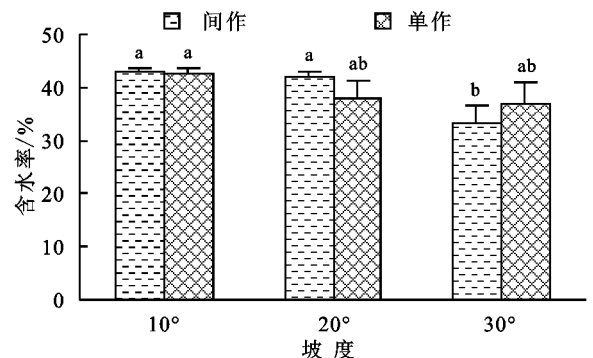


图 2 不同种植模式下的土壤含水率

### 2.2 不同种植模式土壤团聚体特征

从表 1 数据可以看出, 仅在 10°坡耕地上单间作土壤团聚体含量存在部分粒径存在显著差异, 20°, 30°坡耕地大豆单间作模式间土壤团聚体含量无显著

差异。先 10°坡上间作模式的最优势径级是<0.106 mm,1~2 mm 次之,单作优势径级 0.25~0.5 mm 和 0.106~0.25 mm;20°坡上间作最优势径级是 0.5~1 mm,0.25~0.5 mm 次之,单作最优势径级是 0.5~1 mm,1~2 mm 次之;30°坡上,间作最优势径级是 >2 mm,1~2 mm 次之,单作最优势径级 1~2 mm,0.5~1 mm 次之。随坡度增加单间作土壤团聚体优势径级有向大团聚体径级发展趋势。通过同一坡度比较单间作模式可以发现,10°坡上大豆间作后,0.106~0.25 mm 和 0.25~0.5 mm 的团聚体分别显著减少了 15.2%,10.74%,1~2 mm 和<0.106 mm 的团聚体显著增加了 5.65%,10.3%,>2 mm 的团聚体增加了 8.58%;20°坡上大豆间作后,>2 mm,1~2

mm 和 0.5~1 mm 的团聚体分别减少了 2.38%,0.51%,0.09%,0.25~0.5 mm,0.106~0.25 mm 和<0.106 mm 的团聚体分别增加了 0.58%,1.77%,2.69%;30°坡上大豆间作后,1~2 mm,0.5~1 mm,0.25~0.5 mm,0.106~0.25 mm 和<0.106 mm 的团聚体分别减少了 1.9%,1.86%,0.41%,2.35%,0.27%,>2 mm 的团聚体增加了 6.8%。

由表 2 可知,各指标同一坡度下单间作之间无显著差异。 $R_{0.25}$  间作模式下 10°和 30°坡分别增加了 6.61%,2.63%,在 20°坡减少了 4.46%;平均重量直径间作后在 10°和 30°坡分别增加了 32.84%,9.09%,在 20°坡减少了 10.13%。大豆间作玉米后分形维数在 10°,20°坡上分别增加了 2.85%,3%。

表 1 不同种植模式下土壤团聚体粒径分布 %

坡度/(°)	种植模式	粒径					
		>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.106~0.25 mm	<0.106 mm
10	间作	15.60±5.05ab	23.35±3.34a	19.99±2.36a	9.89±2.89c	5.49±1.48d	25.67±1.74a
	单作	9.95±4.88b	13.05±2.73c	18.59±1.65a	20.63±1.10a	20.69±1.98a	17.09±4.07b
20	间作	8.65±1.91b	17.14±2.34bc	21.45±1.91a	19.89±0.83a	18.39±2.49ab	14.48±2.01bc
	单作	11.03±1.74b	19.71±1.53ab	21.54±0.19a	19.31±1.03a	16.62±0.61bc	11.79±0.81c
30	间作	22.31±8.12a	19.20±3.07ab	17.95±5.25a	15.40±1.65b	13.30±1.05c	11.84±2.78c
	单作	15.51±4.70ab	21.10±4.31ab	19.81±1.56a	15.81±2.43b	15.65±4.16bc	12.11±3.29c

表 2 土壤团聚体特征

坡度/(°)	种植模式	$R_{0.25}/\%$	MWD/mm	$D$
10	间作	68.83±3.18ab	0.89±0.12ab	2.53±0.02a
	单作	62.22±5.35b	0.67±0.08b	2.46±0.07ab
20	间作	67.13±4.51ab	0.71±0.07ab	2.40±0.05ab
	单作	71.59±0.98a	0.79±0.03ab	2.33±0.02b
30	间作	74.86±2.11a	0.96±0.08a	2.34±0.09b
	单作	72.23±7.07a	0.88±0.14ab	2.34±0.10b

2.3 不同种植模式下固土能力特征

由表 3 和图 3 可知,在不同种植模式和坡度上大

豆根土土体所受载荷与位移之间存在线性正相关关系。其中,通过比较在相同载荷的位移量可以看出,间作后在 10°与 30°坡上固土能力大于单作,20°坡上结果相反。3 个临界载荷点在同一坡度上单间作之间差异并不显著。通过比较均值,10°坡上  $F_1$ , $F_2$ , $F_3$  均高于单作,间作提高了根土复合体弹性形变量和塑性形变量,20°坡上间作  $F_1$ , $F_2$  均低于单作,30°坡上间作  $F_1$  低于单作, $F_2$  高于单作,增加了根土复合体弹性形变量。

表 3 载荷与位移相关关系方程及关键临界点

坡度/(°)	种植模式	相关方程	$R^2$	$F_1$	$F_2$	$F_3$
10	间作	$y=0.1746x+0.3836$	0.9773	0.28±0.25a	0.42±0.22ab	1.07±0.14a
	单作	$y=0.1868x+0.2534$	0.9782	0.13±0.11a	0.34±0.05ab	1.02±0.05a
20	间作	$y=0.1768x+0.2512$	0.9909	0.18±0.11a	0.25±0.09b	1.18±0.02a
	单作	$y=0.1596x+0.3821$	0.9871	0.31±0.11a	0.36±0.13ab	1.19±0.23a
30	间作	$y=0.1542x+0.4915$	0.8566	0.19±0.15a	0.54±0.05a	1.20±0.06a
	单作	$y=0.1470x+0.4568$	0.9750	0.36±0.04a	0.52±0.05a	1.20±0.10a

2.4 不同种植模式下根系特征

经方差分析,大豆根长和根表面积在不同坡度单间作模式下均无显著差异,根体积在 20°坡耕地上具有显著差异。由表 4 可知,根系指标在不同种植模式下都有随坡度增加而降低的趋势。大豆间作玉米后根长在 10°,20°和 30°坡上分别减少了 4.6%,3.82%,

10.12%;20°坡上根表面积间作后在各坡度上分别减少了 14.42%,15.96%,22.67%;根体积在各坡度下间作比单作分别减少了 30.8%,46.25%,31.29%。

2.5 含水率、团聚体、根系特征和固土能力相关性分析

由表 5 可以看出,单作模式下,含水率与分形维数( $D$ )达到显著正相关,与平均重量直径(MWD)和



>0.25 mm 稳定性团聚体却是显著负相关,平均重量直径和分形维数显著负相关,与>0.25 mm 稳定性团聚体显著正相关,分形维数与>0.25 mm 稳定性团聚体达到显著负相关,根长与  $F_2$  显著负相关,根体积与  $F_1$ 、 $F_2$  显著正相关。间作模式下,含水率与土壤团聚体分形维数达到显著正相关,与>0.25 mm 稳定性团聚体达到显著负相关,平均重量直径与>0.25 mm 稳定性团聚体达到显著正相关。间作与单作相比,间作降低了含水率对平均重量直径的负作用,增强了含水率对分形维数、>0.25 mm 稳定性团聚体的作用影响,平均重量直径和>0.25 mm 稳定性团聚体与  $F_1$ 、 $F_3$  的关系在间作模式下转为负相关,分形维数在间作模式下与  $F_1$ 、 $F_2$  的关系转为正相关,间作模式下根长与  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  的负相关转为正相关,根表面积与  $F_2$ 、 $F_3$  的关系转为正相关,根体积与  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  相关性降低。

表 4 不同种植模式下根系特征

坡度/(°)	种植模式	根长/cm	根表面积/cm <sup>2</sup>	根体积/cm <sup>3</sup>
10	间作	1124.41±348.68a	157.16±32.88a	1.82±0.29b
	单作	1178.75±367.09a	183.65±32.08a	2.63±0.39ab
20	间作	954.77±126.26a	144.29±44.80a	1.79±0.87b
	单作	992.69±302.48a	171.69±35.93a	3.33±1.27a
30	间作	892.12±326.68a	149.28±28.00a	2.13±0.17ab
	单作	992.55±300.02a	193.04±21.03a	3.10±0.36a

3 讨论

3.1 大豆玉米间作对土壤团聚体特征的影响

从土壤团聚体的粒径分布结果和>0.25 mm 稳定性团聚体来看,间作在 10°,30°坡上相对于单作都是减小了<0.25 mm 小团聚体,增加了>0.25 mm 大团聚体的分布,总体上间作对大团聚体的增加是有作用的。结果与周晓晨等<sup>[20]</sup>研究结果一致。从根系特征来看,20°坡上间作低于单作的原因可能是作物根体积显著降低,间作后根体积的降低影响到了根定

积,作为大团聚体胶结物质的土壤中有有机质含量过低<sup>[21]</sup>,所以形成的>0.25 mm 稳定性团聚体较单作低。这也就影响到了平均重量直径在20°坡上的减小,但是在 10°,30°坡上间作增加了平均重量直径。10°坡上间作增加大稳定性土壤团聚体的优势更加明显,这和孙志旭等<sup>[22]</sup>在 3°,6°,9°坡上研究结果一致。

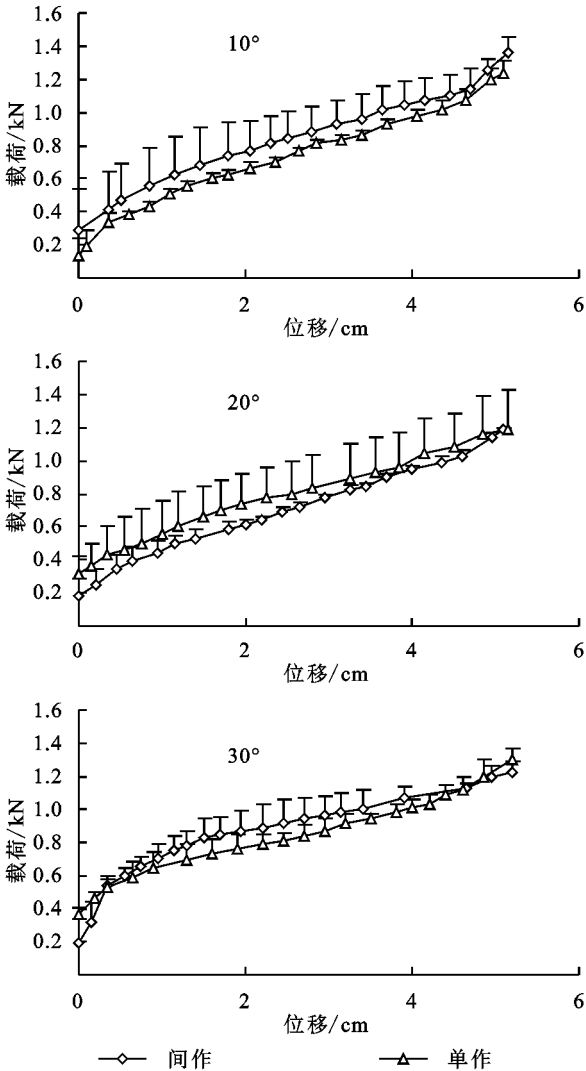


图 3 不同种植模式和坡度下土体载荷与位移间的关系

表 5 大豆单间作下含水率、团聚体特征、根系特征和固土能力的相关关系

项目		单作									
		含水率	MWD	$D$	$R_{0.25}$	根长	根表面积	根体积	$F_1$	$F_2$	$F_3$
间作	含水率	1	-0.797 *	0.718 *	-0.763 *	0.036	-0.292	-0.229	-0.66	-0.182	0.066
	MWD	-0.484	1	-0.849 * *	0.943 *	0.119	0.325	-0.02	0.508	0.097	0.031
	$D$	0.801 *	-0.055	1	-0.964 * *	0.158	0.041	-0.113	-0.607	-0.110	-0.058
	$R_{0.25}$	-0.817 *	0.769 *	-0.631	1	-0.061	0.086	0.082	0.566	0.089	0.066
	根长	0.458	0.000	0.594	-0.374	1	0.899 * *	-0.914 * *	-0.663	-0.750 *	-0.662
	根表面积	0.133	0.128	0.353	-0.200	0.796 *	1	-0.721 *	-0.348	-0.542	-0.558
	根体积	-0.384	0.199	-0.146	0.138	0.180	0.723 *	1	0.708 *	0.858 * *	0.650
	$F_1$	0.019	-0.258	0.039	-0.042	0.300	-0.030	-0.218	1	0.704 *	0.624
	$F_2$	-0.167	0.176	0.124	0.156	0.452	0.231	0.000	0.722 *	1	0.732 *
	$F_3$	-0.097	-0.285	-0.104	-0.217	0.486	0.329	0.091	0.413	0.589	1

注: \* 表示相关性在 0.05 水平上显著, \* \* 表示在 0.01 水平上显著。

土壤团聚体平均重量直径代表团聚体的物理结构特征。平均重量直径值越大说明土壤团聚体中大团聚体更多。大豆单作下平均重量直径随坡度增加而升高的结果和徐程等<sup>[23]</sup>平均重量直径受水分影响的结果一致,土壤中大团聚体增加,水稳定性更强。马仁明等<sup>[24]</sup>研究表明土壤前期含水率在达到15%之后继续增加时,红壤团聚体受快速湿润而破碎的消散作用降低,转为机械作用和土壤矿物湿润后非均匀膨胀作用,所以平均重量直径会随水分增加而增大。大豆间作玉米时,10°和30°坡上团聚体平均重量直径间作比单作高与王英俊等<sup>[25]</sup>间作白三叶增加果园水稳性团聚体平均重量直径的结果一致,间作增加了团聚体结构中的大团聚体。

土壤团聚体的分形维数代表了土壤物理结构特征,本研究中的结果与白录顺<sup>[13]</sup>、王婷<sup>[26]</sup>等玉米大豆间作减小分形维数的结果相反,间作模式下增加了分形维数。间作增加了土壤中的大团聚体,同时也增加了土壤中黏粒物质,可能由于黏粒物质的影响大于大团聚体的影响,从而导致分形维数增加。张秦岭等<sup>[27]</sup>研究表明受土壤侵蚀影响,农田中土壤颗粒分形维数随坡度增加而呈降低的趋势,与本研究结果一致,坡度越大分形维数越低。由此推测间作增加分形维数有助于抵抗土壤侵蚀、调整土壤结构。

### 3.2 大豆玉米间作对根系特征和固土能力的影响

大豆间作后,根系生长较单作有所下降,与前文分形维数的讨论结果较一致。间作后的土壤结构并不利于根系的生长,因此间作后根系对土壤团聚体所能产生的物理作用会降低,相邻土壤颗粒间空间距离增大,不利于团聚体形成。王婷等<sup>[26]</sup>研究发现,间作后作物根系分泌物会增加,增加的有机物质胶结形成更多的大团聚体,根系生物化学作用强于根系物理作用,所以本研究中根系指标降低情况下,在10°、30°坡度下大豆玉米间作下大团聚体比重增加而没有减少。间作后根系生物化学作用会增强根系物理作用,调整土壤结构及形成更多大团聚体。

陈小强等<sup>[12]</sup>研究结果表明间作可以提高作物固土能力与本研究结果一致,结果不一致的地方在于间作没有增加根系密度也增加了固土能力,说明间作对固土能力的影响不仅仅只依赖于根系的物理结构,同时需要考虑其根系生物化学作用。根系的生物化学作用体现在通过对土壤的影响间接影响固土能力。比例极限点、屈服拉力点、抗拉极限点在间作模式下的增大,说明了间作可以增加根土复合体弹性形变阶

段、塑性形变阶段。这种增强效应随坡度增加根系减少而减弱,最后只能增加根土复合体的弹性形变阶段。土壤团聚体中 $>0.25\text{ mm}$ 稳定性团聚体和平均重量直径在间作模式与固土能力有负作用,但是分形维数与比例极限点、屈服拉力点的关系由负相关转变为正相关,说明间作模式下稳定性大团聚体削弱了固土能力,土壤结构增强了固土能力。在10°单间作根系均值上有所降低但无显著差异,此时间作固土能力的增加受着分形维数增加的影响。20°坡耕地大豆间作根体积显著降低,固土能力受此影响间作固土能力低于单作固土能力。30°坡耕地根系与分形维数均无显著差异,但是屈服拉力点到抗拉极限的塑性形变阶段固土能力高于单作,说明分形维数增强了固土能力。

本研究中大豆间作玉米在0—10 cm土层牺牲了自身的根系扩展,没有显著增加土壤稳定性大团聚体的形成降低土壤分形维数,而是增加了土壤团聚体分形维数,从而优化土壤结构来增强大豆根土复合体的固土能力。

## 4 结论

(1) 与单作大豆相比,大豆间作玉米在10°,30°坡上 $>0.25\text{ mm}$ 的稳定性团聚体含量和平均重量直径分别增加了6.61%,2.63%和32.84%,9.09%,在10°坡上增加最多;20°坡上,间作的根体积显著降低,直接影响到了大团聚体形成,说明根系对大团聚体的形成有着重要作用。间作模式下分形维数在10°,20°坡上分别比单作模式增加了2.85%,3%,30°坡无显著差异,表明间作对分形维数有作用,但是随坡度增加对分形维数的影响降低。

(2) 与大豆单作相比,大豆间作玉米根系指标均值上有所降低,间作会减少根系的扩展,相关性来看间作下根长和根体积与关键载荷点的相关性降低,根系指标与分形维数的相关性增强。

(3) 大豆间作在稳定性大团聚体削弱根土复合体固土能力的同时,土壤团聚体分形维数会增强固土能力。10°坡耕地单间作模式根系指标无显著差异时,大豆间作的土壤团聚体分形维数的增加,固土能力高于单作。20°坡耕地大豆间作根体积显著降低,固土能力低于单作。30°坡耕地大豆单间作根系指标和分形维数都无显著差异或趋势时,间作的分形维数影响强于单作,间作固土能力高于单作。

### 参考文献:

- [1] 云南省国土资源厅.云南省第二次全国土地调查主要数  
据成果的公报[R/OL].(2014-03-04).<http://dnr.yn.gov.cn/>

- gov.cn/html/2017-12/1928369785.html.
- [2] 金慧芳,史东梅,陈正发,等.基于聚类及PCA分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J].农业工程学报,2018,34(7):155-164.
- [3] Danjon F, Fourcaud T, Bert D, et al. Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster* [J]. New Phytologist, 2005,168(2):387-400.
- [4] Crook M J, Ennos A R. The anchorage mechanics of deep rooted larch, *Larix europea*  $\times$  *L. japonica* [J]. Journal of Experimental Botany, 1996,47(10):1509-1517.
- [5] 陈昌富,刘怀星,李亚平.草根加筋土的室内三轴试验研究[J].岩土力学,2007,28(10):2041-2045.
- [6] 郭维俊,黄高宝,王芬娥,等.植物根系若干力学问题研究[J].中国农机化,2006(2):84-88.
- [7] 毛妍婷,郑毅, Michael Augustin FULLEN, 等.油菜根系固土拉力的原位测定研究[J].云南农业大学学报:自然科学版,2008,23(6):826-831.
- [8] 毛妍婷,郑毅,李永梅,等.狗尾草根根系固土拉力的原位测定[J].土壤通报,2009,40(3):580-584.
- [9] 郑朝元,范茂攀,郑毅,等.玉米根系原位固土力学特性研究[J].云南农业大学学报:自然科学版,2010,25(4):562-567.
- [10] 王斌,范茂攀,郑毅,等.香根草根根系固土拉力的原位测定[J].云南农业大学学报:自然科学版,2012,27(2):257-262.
- [11] 黑志辉,范茂攀,毛昆明,等.间作条件下玉米根系固土力原位测定[J].中国农学通报,2014,30(30):188-191.
- [12] 陈小强,范茂攀,王自林,等.不同种植模式对云南省中部坡耕地水土保持的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):48-52,65.
- [13] 白录顺,范茂攀,王自林,等.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[J].水土保持研究,2019,26(1):124-129.
- [14] 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.
- [15] 王润泽,湛芸,李铁,等.紫色土区植物篱前淤积带土壤团聚体稳定性特征研究[J].水土保持学报,2018,32(2):210-216.
- [16] 黄俊,吕茂奎,李晓杰,等.红壤侵蚀区芒萁覆盖对土壤团聚体稳定性的影响[J].亚热带资源与环境学报,2019,14(1):9-16.
- [17] 和俊.云南省坡耕地水土流失综合治理的探索与实践[J].中国水土保持,2011(2):15-17.
- [18] 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):248-253,259.
- [19] 郑毅,范茂攀,李永梅,等.农作物根土复合体固土力学原位测定仪及其应用:中国,201210499212[P].2013-02-27.
- [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] 李小飞.长期间套作下作物生产力、稳定性和土壤肥力研究[D].北京:中国农业大学,2017.
- [22] 孙志旭,王宇,孙玲,等.垄沟秸秆覆盖对土壤团聚体含量及特征的影响[J].吉林农业大学学报,2018(6). DOI:10.13327/j.jjlau.2018.4129.
- [23] 徐程,谷峰,王瑶,等.土壤团聚体和水分动态在3种植被覆盖下的关系[J].水土保持学报,2019,33(1):68-74.
- [24] 马仁明,蔡崇法,李朝霞,等.前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(3):95-103.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 张秦岭,李占斌,徐国策,等.丹江鹦鹉沟小流域不同土地利用类型的粒径特征及土壤颗粒分形维数[J].水土保持学报,2013,27(2):244-249.