

不同播种方式草本植物土壤团聚体特征及 对根系固土力的影响

刘武江¹, 赵燚柯², 段青松⁴, 张立芸³, 杨苑君⁴, 刘宇飞⁴, 熊寿德¹, 和贵祥⁵

(1. 云南地质工程勘察设计院, 昆明 650041;

2. 昆明市土地开发整理中心, 昆明 650100; 3. 云南农业大学 机电工程学院,

昆明 650201; 4. 云南农业大学 水利学院, 昆明 650201; 5. 大理农林职业技术学院, 云南 大理 671000)

摘 要:为明确不同播种方式草本植物的土壤团聚体特征与根系固土力之间的关系,对素土、单播紫花苜蓿、单播非洲狗尾草和混播紫花苜蓿+非洲狗尾草 4 个处理进行无侧限抗压强度试验,采用干筛法和湿筛法测定土壤团聚体组成并对团聚体特征进行了定量分析。结果表明:(1) 种植草本植物有利于小团聚体向大团聚体转化,混播优于单播。(2) 种草处理的机械稳定性和水稳定性大团聚体含量 $R_{0.25}$ 极显著大于素土,分形维数 D_d 正好相反 ($p < 0.01$),种植草本植物能够提高土体的大团聚体含量,降低土壤的分形维数,混播优于单播。(3) 4 个处理的平均重量直径 MWD、几何平均直径 GMD、大团聚体含量 $R_{0.25}$ 与黏聚力呈正相关性,分形维数 D_d 呈负相关性;不同播种方式的分形维数 D_d 与黏聚力的相关性最好,其次是 $R_{0.25}$ 。混播的机械稳定性和水稳定性团聚体分形维数 D_d 均呈极显著性相关 ($p < 0.01$),混播改变了土壤的团粒结构,分形维数对于土体黏聚力的贡献最大。种植草本植物能提高土壤大团聚体含量,降低土壤分形维数,对根系的固土能力起到促进作用,且混播优于单播。

关键词:不同播种方式; 草本植物; 土壤团聚体; 固土能力

中图分类号:S157.2; S152

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0025-07

Effects of Different Sowing Patterns of Herbs on Soil Aggregates Characteristics and Consolidating Soil Ability of Roots

LIU Wujiang¹, ZHAO Yike², DUAN Qingsong⁴, ZHANG Liyun³,

YANG Yuanjun⁴, LIU Yufei⁴, XIONG Shoude¹, HE Guixiang⁵

(1. Yunnan Geological Engineering Survey and Design Institute, Kunming 650041, China; 2. Kunming Land Development and Consolidation Center, Kunming 650100, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 5. Dali Vocational and Technical College of Agriculture and Forestry, Dali, Yunnan 671000, China)

Abstract: In order to clarify the relationship between soil aggregate characteristics and consolidating soil capacity of herbs under different sowing patterns, unconfined compressive strength tests were carried out in four treatments: plain soil, single sowing of *Medicago sativa* L., single sowing of *Setaria anceps* Stapf ex Massey L. and mixed sowing of *Medicago sativa* L. and *Setaria anceps* Stapf ex Massey L. The results showed that: (1) planting herbs was conducive to the transformation from small aggregates to large aggregates, and mixed sowing was better than single sowing; (2) the results showed that the mechanical stability and water stability macro-aggregate content ($R_{0.25}$) of grass planting treatment were significantly higher than those of plain soil, and the fractal dimension (D_d) was the opposite ($p < 0.01$); planting herbs could increase the content of macro-aggregate in soil, reduce the fractal dimension of soil, and mixed sowing was better than single sowing; (3) the mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and macro-aggregate content ($R_{0.25}$) were positively correlated with cohesion, while fractal dimension (D_d) was nega-

收稿日期: 2020-10-16

修回日期: 2020-12-18

资助项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费(201511003-3); 国土资源部“西南多样性区域土地优化配置与生态整治科技创新团队”开放基金(YNTD2018KF05)

第一作者: 刘武江(1993—), 男, 云南曲靖人, 硕士, 研究方向为土地生态利用与保护。E-mail: 804310301@qq.com

通信作者: 和贵祥(1970—), 男, 云南迪庆人, 副教授, 研究生学历, 主要从事土壤学研究。E-mail: 1454248652@qq.com

tively correlated with cohesion; the fractal dimension (D_d) of different sowing patterns had the best correlation with cohesion, followed by ($R_{0.25}$); the fractal dimension (D_d) of mixed sowing had significant correlation with mechanical stability and water stability ($p < 0.01$); mixed sowing changed the soil aggregate structure, and the fractal dimension had the greatest contribution to the soil cohesion. Planting herbs can increase the content of soil macroaggregates, reduce the fractal dimension of soil, and promote the consolidating soil ability of root system, and mixed sowing is better than single sowing.

Keywords: different sowing patterns; herb; soil aggregate; soil consolidation ability

植物护坡技术是目前土地生态整治最常用的手段之一^[1],植物根系生长在土壤中交织形成网状结构,且自身会挤占土壤空间位置,增大与土壤的摩擦接触面积,改变土壤原有结构^[2];根系分泌物和微生物活动会改变不同粒径级的团聚体含量,影响土壤团聚体的稳定性^[3-4]。根土复合体在外力作用下,不仅有根系的抗拉作用,土壤团聚体结构对土体也具有骨架稳定作用^[5]。

Frei 等^[6]通过三轴试验在冰碛土发现,土壤团聚体稳定性与抗剪强度有关。Zhang 等^[7]对华南丘陵花岗质地区红壤的抗剪强度研究时,指出在相同基质吸力条件下,土壤黏聚力和摩擦角随土壤分形维数的增大而减小,土壤分形维数随土壤细粒含量的增加而增大,细颗粒损失的整体效应会降低抗剪强度。Fattet 等^[8]在研究植被类型对土壤抗侵蚀性能的影响时,指出慢湿润后的团聚体平均重量直径 MWD 与凝聚力 C 呈显著正相关,而 Zeng 等^[9]指出慢湿润的 MWD 越高,对应的团聚体越稳定,抗侵蚀能力越强,还发现林草地的慢湿润 MWD 值高于草地。杨幼清等^[10]在矿区排土场进行了草本植物根系增强排土场边坡土体抗剪强度试验得出混播种植的土体抗剪强度显著增加,剪切位移正好相反,凝聚力受根系数量的影响显著,而内摩擦角受土体中粒径 $0.25 \sim 0.075$ mm 砂粒含量的影响。邓超等^[11]在研究大豆玉米间作对土壤团聚体及固土能力的影响时得出间作的固土能力会被稳定性大团聚体削弱,而同时土壤团聚体分形维数会增加固土能力。可见,土壤团聚体特征对根系固土力会产生影响,但现有研究比较零散。目前不同播种方式的草本植物在生态修复中广泛应用,草本植物对土体抗剪强度的影响研究主要集中于根系特征方面^[12-14],而土壤团聚体特征对抗剪强度影响的研究较少。本文以两种草本植物进行单播及混播种植,对土壤团聚体特征及其对抗剪强度的影响进行研究,为采用合理的播种方式进行生态修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于昆明市盘龙区云南农业大学后山

试验基地,种植区为平地,地理位置为 $102^{\circ}44'57''E$, $25^{\circ}7'44''N$,海拔 1 930 m,属亚热带—高原山地季风气候。年平均气温 $15^{\circ}C$,年均日照 2 200 h 左右,无霜期 240 d 以上。年降雨量 $900 \sim 1\,000$ mm,年蒸发量 1 856 mm,雨季为 7—9 月,土壤为山原红壤, <0.01 mm 黏粒为 54.61%, $1 \sim 0.01$ mm 黏粒为 45.39%,肥力中等。

1.2 试样制备

本研究选用 2 种固土护坡研究较多且适宜研究区种植的草本植物:非洲狗尾草 (*Setaria anceps* Stapf ex Massey L.), 多年生禾本科狗尾草属植物,斜生型根系;紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.), 多年生豆科草本植物,垂直型根系^[15]。试验设置素土、单播/非洲狗尾草、单播/紫花苜蓿、混播/非洲狗尾草+紫花苜蓿 4 个处理,其中素土为对照组。每个处理 10 个重复,共计 40 个样品。

试验于 2017 年 7 月进行,采用 $\Phi 110$ mm \times 3.2 mm 的 PVC 管,每 50 cm 长等距切割并沿中轴线分为两半,对合后均匀固定 3 个管卡,并用塑料袋封住底部,制成能盛土的管状桶。土样采用试验地 15 cm 以下土层的原状土,去除表层杂质干扰,将土料过 5 mm 筛。装土时,保证每桶装同量的土,并使各处理的土壤干密度与试验地原状土保持一致。每根管内种植 6 株植物,以 PVC 管中点为中心,均匀种植在半径为 30 mm 的圆周上,消除种植密度和间距的影响。将播种完成后的管状桶做好标记,放置在室外,定期浇水管护。

2018 年 10 月初,植株生长 1 a 后,4 个处理各取 9 个样品,共 36 个立放在水中浸泡 24 h 后取出,松开紧箍 PVC 管的管卡,分开 PVC 管,取出土柱;剪去地上部分,用钢锯缓慢平稳地将柱体从中间锯开分为两节,每节的高度为 25.0 cm,截取中间 20.0 cm 为试样,截面直径为 10.36 cm,分别称重后计算柱体的饱和密度。每个柱体取截下的土样 10 g 左右,放入铝盒,称重后用烘干法测定土样的饱和含水量^[15]。

1.3 柱体无侧限抗压强度的测定

采用南京土壤仪器厂生产的 SJ-1A 型应变控制

式三轴仪进行无侧限抗压强度试验。无侧限抗压强度试验是围压为 0 的三轴压缩试验,根据摩尔—库伦理论,只要测出试样的最大主应力,就可以确定摩尔应力圆,其顶点的切线即为库仑直线,该直线为一水平线,其在纵轴上的截距即为黏聚力,内摩擦角为 0,土体的抗剪强度全部以黏聚力的形式表现^[16]。试验步骤按照土工试验规程^[17]进行。

1.4 土壤团聚体粒径测定

采用干筛法和湿筛法进行机械稳定性和水稳定性团聚体组成分析,试验仪器为 TPF-100 土壤团粒结构分析仪。具体方法如下:将无侧限抗压试验结束后的根土复合体中的土壤放在室内通风良好处,当样品稍干时,将土样沿着自然结构轻轻地掰成直径约 10 mm 左右的小块,风干,每个土柱在 0—25,25—50 cm 土层采集的预留的风干后的土样称取 400 g 置于套筛(孔径从大到小依次为 10,5,2,1,0.5,0.25 mm)的最上层,盖上上部盖子后进行筛分,以 30 次/min 的频率震荡 3 min 后停止,将>0.25 mm 的土壤团聚体按照不同粒径由上到下的次序依次取筛,称取各孔径筛上的土样重量,计算各粒径的团聚体占总量的百分比。再将干筛后的土样按上述各粒径在原状土所占百分比配备混合土样 50 g 置于套筛(孔径从大到小依次为 5,2,1,0.5,0.25 mm),再放入铁桶中,缓慢加入水并静置 5 min,以 30 次/min 的频率湿筛 3 min,将各级套筛上的团聚体洗入装有滤纸的漏斗上,将盛有水稳性团聚体的滤纸放在烘箱内,烘干至恒重,然后在大气中放置一昼夜,使其呈风干状态,称重 W_{wi} (精确到 0.01 g),计算各粒径的团聚体占总量的百分比。

利用各粒径团聚体数据,计算大于 0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均值

经(GMD)、分形维数(D_d)等土壤团聚体特征值。

$$R_{0.25}=1-\frac{M_{r<0.25}}{M_T}$$
(1)

$$MWD=\sum_{i=1}^n x_i y_i$$
(2)

$$GMD=\exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n y_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n y_i}\right]$$
(3)

$$D_d=3-\frac{\lg(w_i/w_0)}{\lg(\overline{d_i}/\overline{d_{\max}})}d_{i+1}$$
(4)

式中: $M_{r<0.25}$ 为直径小于 0.25 mm 的团聚体重量(g); M_T 为团聚体总重量(g); x_i 为第 i 级范围内团聚体的平均直径(mm); y_i 为对应于 x_i 的团聚体质量分数(%); n 为粒级数; w_i 为直径小于 d_i 的累积质量(g); w_0 为总质量(g); $\overline{d_i}$ 为相邻径级 d_i 与 d_{i+1} 间土粒平均直径(mm); $\overline{d_{\max}}$ 为最大粒级土粒平均直径(mm)。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 软件和 SPSS 18.0 软件对测定数据进行整理和统计,用单因素方差分析法进行数据间的分析比较,对柱体抗剪强度与不同土壤团聚体指标参数进行 Pearson 相关性分析。表中数据以平均值±标准误差的形式表达,不同大写字母表示同一土层不同处理类型之间的差异极显著($p<0.01$),不同小写字母表示同一土层不同处理类型之间的差异显著($p<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同播种方式对土壤黏聚力的影响

受压柱体的饱和密度、饱和含水量、黏聚力见表 1。种草 3 个处理的饱和密度、饱和含水量无显著差异,固土力(黏聚力增量)以混播紫花苜蓿+非洲狗尾草最高,其次为非洲狗尾草,紫花苜蓿最低。

表 1 受压柱体的饱和密度、饱和含水量、黏聚力

深度范围/cm	处理	饱和密度/(g·cm ⁻³)	饱和含水量/%	黏聚力/kPa	黏聚力增量/kPa
0—25	素土	1.798±0.014b	43.538±1.482a	8.616±0.665C	0
	紫花苜蓿	1.932±0.013a	39.122±0.616a	19.466±1.964B	10.850±1.964b
	非洲狗尾草	1.891±0.029a	40.745±3.397a	24.204±2.36AB	15.587±2.36ab
	紫花苜蓿+非洲狗尾草	1.923±0.014a	38.930±1.016a	28.900±2.219A	20.284±2.219a
25—50	素土	1.805±0.031b	42.622±0.571a	8.168±0.646C	0
	紫花苜蓿	1.900±0.015a	39.381±0.472a	13.298±1.763BC	5.134±1.764b
	非洲狗尾草	1.914±0.033a	36.833±2.241a	19.524±2.541AB	11.356±2.541ab
	紫花苜蓿+非洲狗尾草	1.957±0.023a	38.149±0.861a	23.117±2.417A	14.95±2.417a

2.2 不同播种方式对土壤团聚体组成的影响

与素土相比,种草处理的机械稳定性团聚体组成变化主要在<0.25,1~2 mm 粒径范围内,有根土处理<0.25 mm 粒径含量极显著地小于素土,有根土 1~2 mm 粒径含量显著大于素土,其他粒径无显著变化,说明

种植草本植物有使<0.25 mm 粒径向 1~2 mm 粒径转化的趋势。但混播与单播之间无显著性差异。

水稳定性团聚体含量 4 个处理均以<0.25 mm 颗粒的含量最高,有根土极显著小于素土,混播与单播无显著性差异,混播值最低,其次是 2~5 mm 颗

粒,有根土极显著大于素土,另外有根土 >5 mm, 1~2 mm, 0.5~1 mm 颗粒含量显著大于素土,混播与单播无显著性差异,混播值均最高。

对比土壤机械稳定性和水稳定性团聚体组成,4 个处理 >5 mm 水稳定性团聚体含量比机械稳定性

团聚体含量下降超过 70%,而 <0.25 mm 则相反,在 0—25 cm 和 25—50 cm 土层,素土增加 40%左右,有根土的增加幅度为 50%~70%,说明种植草本植物形成的土壤大团聚体在水中不稳定,在水中会分散,使小团聚体含量增加(图 1)。

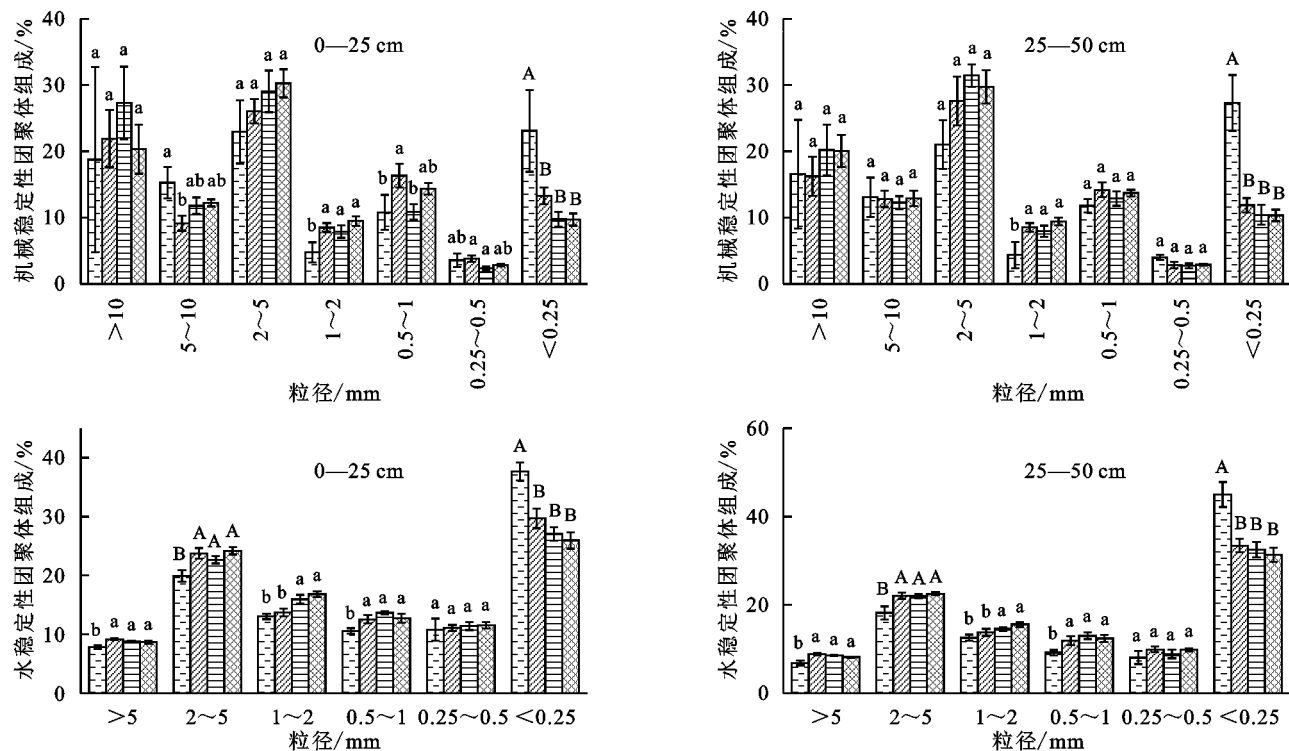


图 1 受压柱体的土壤团聚体组成

2.3 不同播种方式对土壤团聚体特征的影响

平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标, MWD和GMD值越大表示土壤平均粒径的团聚度越高,稳定性越好^[18]。在机械稳定性方面,4个处理的MWD和GMD大小在0—25 cm和25—50 cm土层均表现为:混播 $>$ 单播非洲狗尾草 $>$ 单播紫花苜蓿 $>$ 素土,除了在25—50 cm土层混播的MWD与单播紫花苜蓿差异显著,其余各土层各处理间的MWD和GMD差异不大。在水稳定性方面,在0—25 cm和25—50 cm土层,素土的MWD和GMD小于种草处理,混播值最大;种草处理的MWD与素土存在显著性差异,单播紫花苜蓿与素土差异不明显。

分形维数 D_d 反映了土壤团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势,其值越大,团聚体的分散度越大,土壤结构越不稳定^[19]。在机械稳定性方面,与素土相比,3个种草处理的 D_d 在0—25 cm土层各降低8.19%, 11.12%, 11.95%, 25—50 cm土层各降低9.67%, 11.67%, 12.37%。种草处理与素土呈极显著差异,混播与单播无显著差异,但混播的 D_d 值最小。在水稳定性方面,3个种草处理相比素土, D_d 在0—

25 cm土层各降低2.95%, 4.68%, 6.05%, 25—50 cm土层各降低3.83%, 4.19%, 5.23%。种草处理与素土呈显著差异;混播与素土呈极显著差异,与单播无显著差异,混播的 D_d 值最小。

土壤中大于0.25 mm的团聚体称为土壤大团聚体含量 $R_{0.25}$,其数量和分布特征能够表征土壤结构稳定性^[20]。3个种草处理的机械稳定性 $R_{0.25}$ 比素土提高了12.76%~23.36%,且与素土呈极显著差异,混播与单播无显著差异,混播的 $R_{0.25}$ 值最高。4个处理水稳定性 $R_{0.25}$ 在0—25 cm和25—50 cm土层均表现为:混播 $>$ 单播非洲狗尾草 $>$ 单播紫花苜蓿 $>$ 素土;除了在0—25 cm土层,单播紫花苜蓿与素土呈显著差异,3个种草处理 $R_{0.25}$ 极显著大于素土;与机械稳定性相比, $R_{0.25}$ 值较小,说明柱体内水稳定性团聚体含量比机械稳定性团聚体低。

因此,从机械稳定性和水稳定性团聚体特征来看,种植草本植物,特别是混播种植,能够降低土壤的 D_d ,提高土体的 $R_{0.25}$ 和MWD,对GMD影响不明显(表2—3)。

2.4 不同种植方式草本植物土壤团聚体特征与根系固土力的关系

从机械稳定性来看,素土GMD, D_d 与黏聚力的相关

系数较大,最小的是 $R_{0.25}$,GMD 与黏聚力呈显著相关。3 个种草处理的相关系数表现出: $D_d > R_{0.25} > \text{MWD} > \text{GMD}$ 。4 个处理的 D_d 与黏聚力相关性最好,相关系数为:混播>单播>素土,混播达到极显著相关。

表 2 受压柱体的土壤机械稳定性团聚体指标

深度范围/cm	处理	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}/\%$	D_d
0—25	素土	1.88±0.35a	1.64±0.19a	76.9±6.167B	2.661±0.016A
	紫花苜蓿	2.177±0.098a	1.821±0.04a	86.709±1.271A	2.443±0.022B
	非洲狗尾草	2.253±0.106a	1.867±0.051a	90.244±1.132A	2.365±0.034BC
	紫花苜蓿+非洲狗尾草	2.264±0.135a	1.853±0.088a	90.283±0.932A	2.343±0.028C
25—50	素土	1.782±0.118b	1.68±0.053a	72.679±4.196B	2.7±0.02A
	紫花苜蓿	1.863±0.089b	1.787±0.046a	87.254±1.156A	2.439±0.038B
	非洲狗尾草	2.082±0.108ab	1.815±0.094a	89.592±1.499A	2.385±0.033B
	紫花苜蓿+非洲狗尾草	2.236±0.096a	1.826±0.049a	89.656±0.874A	2.366±0.032B

表 3 受压柱体的土壤水稳定性团聚体指标

深度范围/cm	处理	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}/\%$	D_d
0—25	素土	0.571±0.055b	0.921±0.03a	62.367±1.511Bb	2.711±0.023Aa
	紫花苜蓿	0.606±0.021b	0.988±0.015a	69.193±1.846Ba	2.631±0.021b
	非洲狗尾草	0.657±0.016a	0.985±0.018a	72.951±1.138A	2.584±0.016B
	紫花苜蓿+非洲狗尾草	0.676±0.022a	1.037±0.023a	75.864±1.095A	2.547±0.02B
25—50	素土	0.473±0.035b	0.914±0.041a	55.02±2.811B	2.771±0.014Aa
	紫花苜蓿	0.595±0.023a	0.986±0.046a	66.509±1.365A	2.665±0.018b
	非洲狗尾草	0.57±0.031a	0.996±0.035a	67.482±1.737A	2.655±0.02b
	紫花苜蓿+非洲狗尾草	0.609±0.018a	1.029±0.031a	69.531±1.707A	2.626±0.027B

从水稳定性来看,素土的相关系数大小与机械稳定性一致: $\text{GMD} > D_d > \text{MWD} > R_{0.25}$, D_d 与黏聚力出现显著相关性。3 个种草处理相关系数表现一致: $D_d > R_{0.25} > \text{MWD} > \text{GMD}$ 。4 个处理的 D_d 与黏聚力的相关系数为:混播>单播>素土,混播和单播均呈极显著相关。3 个种草处理的 $R_{0.25}$ 相比机械稳定性方面,相关系数更高,单播、混播出现显著、极显著相关。

整体来看,4 个处理的黏聚力与机械稳定性和水稳

定性团聚体的 MWD,GMD, $R_{0.25}$ 呈正相关,与 D_d 呈负相关。各处理的水稳定性团聚体特征与黏聚力的相关性大小关系与机械稳定性一致,但整体优于机械稳定性。素土的 GMD 与黏聚力的相关系数最高, $R_{0.25}$ 最低,但种草处理的 GMD 相关系数最低, $R_{0.25}$ 相比素土提高 2~8 倍。4 个处理的团聚体指标中 D_d 与黏聚力的相关性最好,其次是 $R_{0.25}$ 。混播的 D_d 在机械稳定性和水稳定性两个方面,与黏聚力均呈极显著相关(表 4)。

表 4 根土复合体黏聚力 C 与土壤团聚体结构指标的相关性

处理	机械稳定性团聚体				水稳定性团聚体			
	MWD	GMD	$R_{0.25}$	D_d	MWD	GMD	$R_{0.25}$	D_d
素土	0.208	0.638*	0.057	-0.592	0.307	0.672	0.251	-0.658*
紫花苜蓿	0.187	0.048	0.428	-0.654*	0.341	0.140	0.608*	-0.678**
非洲狗尾草	0.234	0.014	0.462	-0.670*	0.331	0.202	0.537*	-0.669**
紫花苜蓿+非洲狗尾草	0.318	0.055	0.490*	-0.694**	0.470*	0.256	0.563**	-0.788**

注:* 表示在 0.05 水平上显著相关;** 表示在 0.01 水平上极显著相关。

3 讨论

3.1 不同播种方式对土壤团聚体组成的影响

机械稳定性团聚体组成是指土体具有抵抗外力或抵抗外部环境变化而保持原有形态的团粒构成^[21]。本试验研究结果表明:在机械稳定性方面,4 个处理的机械稳定性团聚体含量以 2~5 mm 颗粒含量最高,3 个种草处理大于素土,混播大于单播,3 个

种草处理在 1~2 mm 粒径含量显著大于素土,素土 <0.25 mm 粒径含量极显著的大于 3 个种草处理。这与张家洋等^[22]在研究混播紫花苜蓿与无芒雀麦的机械稳定团聚体表征一致,且混播与单播差异显著。根系对土颗粒具有绑扎和胶结作用,而混播种植使有胶结作用的分泌物增加^[23],促进和加快小颗粒团聚,种草处理的小颗粒含量比素土快速减少,转而种草处理的大颗粒含量比素土快速增加。

水稳定性团聚体组成反映的是土体在水中或遇水土体寻求稳定而具有的土粒结构。本研究发现 4 个处理 >5 mm 水稳定性团聚体含量相比机械稳定性团聚体含量下降较多, <0.25 mm 颗粒明显增加, 种草处理 <0.25 mm 颗粒含量极显著小于素土, 混播小于单播。可以看出, 土体在水中都会产生部分颗粒的破裂和剥离, 素土结构单一, 在水中土颗粒易溃散, 大颗粒逐渐变成小颗粒; 而有根土形成的大团聚体相比素土更稳定, 不易受水力作用而破坏。蔺芳等^[31]在砂壤土区分别采用紫花苜蓿/无芒雀麦、紫花苜蓿/黑麦草进行了长达 6 a 的混播和单播种植, 发现不同种植方式下土壤水稳性团聚体的变化主要为 <0.25 mm 粒径明显减少, $3\sim 2$ mm 和 $2\sim 0.5$ mm 粒径明显增加, 而且 $5\sim 3$, $3\sim 2$ mm 粒径的大团聚体含量与其有机碳含量、有机质含量均呈极显著正相关, <0.25 mm 正好相反。可见植物种植有利于增加土壤大粒径团聚体胶结剂的胶结作用, 混播更突出。

3.2 不同播种方式对土壤团聚体特征的影响

平均重量直径 MWD、几何平均直径 GMD、大团聚体含量 $R_{0.25}$ 和分形维数 D_d 是常用来评价土壤团聚体稳定性的 4 个指标, 通常情况下, MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 值越大, D_d 值越小则土壤团聚体越稳定^[24-25]。万海霞等^[32]指出 MWD, GMD 与 $R_{0.25}$ 呈正相关, 与 D_d 呈负相关。

MWD 的大小主要受各径级所占比例的影响, 而 GMD 由于粒径经过对数函数 $\ln x$ 运算, GMD 与 >1 mm 颗粒含量呈正相关, 与 ≤ 1 mm 呈负相关^[27]。本研究结果表明: 在机械和水稳定性方面, 混播的 MWD, GMD 均大于单播和素土。唐骏等^[19]对排土场进行植被恢复的研究中, 人工草地种植十多年后, MWD 和 GMD 均显著大于素土, 对应的水稳定性团聚体组成中 >5 , $2\sim 5$, $1\sim 2$, $0.5\sim 1$ mm 的质量分数都大于素土, 与本研究一致。

在本研究中, 在机械和水稳定性方面, 种草处理的 $R_{0.25}$ 极显著大于素土, 且混播高于单播, D_d 正好相反。魏亚飞等^[26]将紫薯、毛叶苕子、荒草套种在猕猴桃果园, 也得到套种模式在不考虑坡位变化时均比单作提高机械和水稳定性 $R_{0.25}$ 。张家洋等^[22]的研究中, 其 D_d 与本研究基本吻合, 混播 $<$ 单播 $<$ 素土。可见, 种植草本植物后, 土壤中根系分泌物、微生物及其代谢物质增多^[3-4], 提高了土体内的有机质含量^[31], 促进大团聚体的形成, 降低了土体的离散程度, 土体结构更稳定, 混播种植更为突出^[23], 将豆科植物和禾本科植物混播, 可促进氮素养分的互通利用, 增强共生效应, 更有利于土壤大团聚体的形成^[33]。

3.3 不同播种方式草本植物土壤团聚体特征与抗剪强度的相关性

植物根系会改变土壤团聚体的结构, 进而影响土体的稳定性。从本研究的相关性来看, 4 个处理的团聚体指标 D_d 与黏聚力的相关性最好, D_d 在两个方面均较高。3 个种草处理在两个方面也表现出 D_d 最高, 其次是 $R_{0.25}$ 和 MWD, GMD 最低。混播的 D_d 在两个方面都与黏聚力 C 呈极显著相关。Pirmoradian 等^[28]在探讨分形维数对干旱地区石灰性土壤团聚体稳定性的影响时, 将 D_d 与 MWD, GMD 进行比较, 表明 D_d 比 MWD, GMD 更适合于量化耕作处理引起的土壤团聚体稳定性。Zhang 等^[7]指出 D_d 随土壤细粒含量(黏粒、粉粒)的增加而增大, 而土壤含水率会影响细粒含量, 同时指出在基质吸力不变时, D_d 降低会影响土壤黏聚力 C 。这说明分形维数 D_d 是衡量土体黏聚力 C 的一个重要指标, 植物通过 D_d 对土体产生较大影响, 混播更为明显^[11]。Fattet^[8]和 Zeng^[9]等研究指出土体受水时间长形成的慢湿润 MWD_{sw} 相比湿润时间短的快湿润 MWD_{fw} 和机械击穿 MWD_{mb}, 与黏聚力 C 呈显著正相关, 混播的慢湿润 MWD_{sw} 值高于单播。结合本试验的土体抗压强度是采用不固结不排水的三轴试验进行的, 试验过程中土体处于饱和状态, 水分会影响土体结构的稳定, 所以水稳定性团聚体结构特征与抗剪强度的相关性更接近真实情况, 本试验的水稳定性团聚体特征与黏聚力的相关性优于机械稳定性, 混播的水稳定性 MWD 与凝聚力相关系数大于单播, 呈显著相关。邓超等^[11]采用大豆玉米间作时指出, 间作后根系生物化学作用会调整土壤结构并形成更多大团聚体, 土壤团聚体结构能间接反映根系的生化作用对固土能力的影响。本研究发现, 3 个种草处理的 $R_{0.25}$ 与黏聚力的相关系数仅次于 D_d , 混播大于单播。大团聚体会形成骨架结构, 具有抵抗施加的垂直应力的作用, 提高土体稳定性。目前来说, 分形维数和大团聚体含量对土体黏聚力影响较大, 混播种植能促进分形维数和大团聚体含量变化进而增强土体黏聚力。就本研究来看, 团聚体的结构受根系的影响较大, 今后还需结合根系特征和根系分泌物做进一步定量分析研究。此外, 土壤水分会影响团聚体的形成及稳定, 而植物的生命活动, 包括呼吸作用、光合作用、蒸腾作用, 以及土壤的蒸发作用都会影响土壤水分分布规律^[29], 而混播种植的植物特征相对单播也有较大变化^[30], 生命活动也会有所不同。混播通过影响土壤水分来改变团聚体特征, 进而影响抗剪强度也有待做进一步研究。

4 结论

(1) 种植草本植物有利于小团聚体向大团聚体转化,混播优于单播。

(2) 素土的大团聚体含量 $R_{0.25}$ 和分形维数 D_d 与种草处理呈极显著性差异。种植草本植物能够提高土体的大团聚体含量,降低土壤的分形维数,混播优于单播。

(3) 分形维数 D_d 与黏聚力的相关性最好,混播在机械稳定性和水稳定性均达到极显著性差异;种草能提高大团聚体含量 $R_{0.25}$ 与黏聚力的相关性,混播改变了土壤的团粒结构,提高了团粒结构指标与 C 的相关性,分形维数对于土体黏聚力的贡献最大。

参考文献:

- [1] Rattan L. Restoring soil quality to mitigate soil degradation[J]. Sustainability, 2015, 7(5): 5875-5895.
- [2] Calusi B, Tramacere F, Gualtieri S, et al. Plant root penetration and growth as a mechanical inclusion problem[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2020, 120. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2019.103344.
- [3] Li N, Han X Z, You M Y, et al. Research review on soil aggregates and microbes[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(9): 1625-1632.
- [4] Pérès G, Daniel C, 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.
- [5] 栗岳洲,付江涛,胡夏嵩,等.土体粒径对盐生植物根—土复合体抗剪强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 403-412.
- [6] Frei M, Boll A, Graf F, et al. Quantification of the influence of vegetation on soil stability[J]. Proceedings of the International Conference on Slope Engineering, 2003, 3(4): 872-877.
- [7] Zhang Yue, Zhong Xiaoyan, Lin Jinshi, et al. Effects of fractal dimension and water content on the shear strength of red soil in the hilly granitic region of southern China [J]. Geomorphology, 2020, 351. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106956.
- [8] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength[J]. Catena, 2011, 87(1): 60-69.
- [9] Zeng Q, Darboux F, Man C, et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China)[J]. Catena, 2018, 167: 276-283.
- [10] 杨幼清,胡夏嵩,李希来,等.高寒矿区草本植物根系增强排土场边坡土体抗剪强度试验研究[J].水文地质工程地质, 2018, 45(6): 105-113.
- [11] 邓超,李永梅,范茂攀,等.大豆单间作对土壤团聚体及固土能力的影响[J].水土保持研究, 2020, 27(2): 77-83.
- [12] 万利,王震洪,杨成波.生态修复区不同植物群体的根系固土力学机理[J].农业工程学报, 2009, 25(10): 278-283.
- [13] 朱琪. 灌草混交根系提高高速公路边坡残余抗剪强度研究[D].长沙:中南林业科技大学, 2018.
- [14] Liu Yaojun, Wang Tianwei, Cai Chongfa, et al. Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Science of the Total Environment, 2014, 485, 93-102.
- [15] 段青松,赵赓柯,杨松,等.不同草本植物根系提高无侧限受压土体的抗剪强度[J].土壤学报, 2019, 56(3): 650-660.
- [16] 陈仲颐.土力学[M].北京:清华大学出版社, 1994.
- [17] 南京水利科学研究院.土工试验规程 SL237—1999 [M].北京:中国水利水电出版社, 1999.
- [18] Ye Luping, Tan Wenfeng, Fang Linchuan, et al. Spatial analysis of soil aggregate stability in a small catchment of the Loess Plateau, China: I. Spatial variability[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 179: 71-81.
- [19] 唐骏,党廷辉,薛江,等.植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J].生态学报, 2016, 36(16): 5067-5077.
- [20] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: II. a normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 1042-1049.
- [21] 瞿晴,徐红伟,吴旋,等.黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征[J].环境科学, 2019, 40(6): 2904-2911.
- [22] 张家洋,蔺芳,詹乃才,等.紫花苜蓿与无芒雀麦不同栽培模式下土壤团聚体形态结构、组成及有机碳特征[J].浙江农林大学学报, 2019, 36(6): 1077-1086.
- [23] 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.
- [24] Yan Fengling, Shi Zhihua, Li Zhaoxia, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China [J]. Soil and Tillage Research, 2008, 100(1/2): 34-41.
- [25] 袁晶晶,同延安,卢绍辉,等.生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J].农业工程学报, 2018, 34(3): 159-165.