

# 连续种植不同绿肥作物的土壤团聚体稳定性及可蚀性特征

张 钦<sup>1</sup>, 于恩江<sup>3</sup>, 林海波<sup>2</sup>, 张爱华<sup>1</sup>, 陈正刚<sup>1</sup>, 朱 青<sup>1</sup>, 曹卫东<sup>4</sup>, 姚单君<sup>1</sup>

(1. 贵州省农业科学院 土壤肥料研究所/农业资源与环境研究所/

农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测试验站, 贵阳 550006; 2. 贵州省土壤肥料工作总站, 贵阳 550003; 3. 贵州大学, 贵阳 550025; 4. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘 要:**为探讨连续种植绿肥对土壤团聚体的影响,以箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.)、肥田萝卜(*Raphanus sativus* L.)、蓝花苕子(*Vicia cracca* L.)、毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth)为研究对象,分析了连续种植不同绿肥作物下的土壤团聚体组成、稳定性及可蚀性特征。结果表明:连续种植绿肥能够提高不同粒径土壤机械稳定性、水稳性团聚体含量,肥田萝卜主要提高 $>2$  mm 粒径的机械稳定性团聚体含量、 $>5$  mm 粒径的水稳性团聚体含量,毛叶苕子、蓝花苕子主要提高 0.25~2 mm 粒径的机械稳定性团聚体含量,蓝花苕子主要提高了 0.25~5 mm 粒径的水稳性团聚体含量。并且,连续种植绿肥有利于形成土壤水稳性大团聚体( $>0.25$  mm), $>5$  mm 粒级的土壤水稳性团聚体的增加对土壤水稳性大团聚体积累的影响较为突出,其中,毛叶苕子的土壤水稳性大团聚体含量最高。另外,连续种植肥田萝卜、毛叶苕子有利于土壤平均重量直径和几何平均直径的提升。同时,连续种植绿肥较清耕显著降低了土壤团聚体破坏率 29%~38.17%,土壤团聚体破坏率表现为毛叶苕子 $<$ 肥田萝卜 $<$ 蓝花苕子 $<$ 箭筈豌豆。除此之外,连续种植绿肥对土壤可侵蚀因子( $K$ )产生了一定的影响,肥田萝卜 $<$ 毛叶苕子 $<$ 箭筈豌豆 $<$ 蓝花苕子,虽然土壤可侵蚀因子( $K$ )与绿肥作物品种间的规律不显著,但是其与土壤团聚体的关系很密切,土壤水稳性大团聚体含量越高,土壤平均重量直径、几何平均直径越大,可蚀性  $K$  值越低,团聚体破坏率越低,土壤结构的稳定性、抗侵蚀性越好。

**关键词:**土壤团聚体; 绿肥; 稳定性; 可侵蚀性

**中图分类号:** S142; S152.4; S157

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2019)02-0009-08

## Stability and Erodibility of Aggregate Affected by Different Continuous Green Manure Cultivations

ZHANG Qin<sup>1</sup>, YU Enjiang<sup>3</sup>, LIN Haibo<sup>2</sup>, ZHANG Aihua<sup>1</sup>,  
CHEN Zhenggang<sup>1</sup>, ZHU Qing<sup>1</sup>, CAO Weidong<sup>4</sup>, YAO Danjun<sup>1</sup>

(1. Guizhou Institute of Soil and Fertilizer/Guizhou Institute of Agricultural Resources and Environment, GAAS/Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agriculture Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture, Guiyang 550006, China; 2. Soil and Fertilizer Station of Guizhou, Guiyang 550003, China; 3. Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To investigate the effects of continuous planting green manure on soil aggregate, five treatments including clean tillage, *Vicia sativa* L., *Raphanus sativus* L., *Vicia cracca* L., *Vicia villosa* Roth were chosen in this study. And the constituent, stability and erodibility under continuous planting green manure cultivation were examined. The results showed that the contents of mechanical-stable and water stable aggregate increased under green manure cultivation. The contents of  $>2$  mm mechanical stable aggregate and  $>5$  mm water stable aggregate were improved in *Vicia sativus* L. field. The contents of 0.25~2 mm mechanical-stable aggregate were improved in fields of *Vicia villosa* Roth and *Vicia cracca* L.. The contents of 0.25~5 mm water-stable aggregate were improved in field of *Vicia cracca* L.. Continuous planting cultivation of

收稿日期: 2018-04-27

修回日期: 2018-05-24

资助项目: 贵州省科学技术基金项目(黔科合 LH 字[2014]7702 号); 贵州省社发攻关项目(黔科合[2016]支撑 2837); 国家绿肥产业技术体系(CARS-22); 公益性行业(农业)科研专项(201103005)

第一作者: 张钦(1988—), 女, 广西荔浦人, 硕士研究生, 助理研究员, 主要从事土壤学与环境生态研究工作。E-mail: zhangqinzq@qq.com

通信作者: 朱青(1962—), 女, 贵州贵阳人, 博士研究生, 研究员, 主要从事生态学研究。E-mail: zhuqing\_gy@tom.com

green manure was beneficial to the formation of water stable macroaggregate ( $>0.25$  mm) and the increase of the contents of  $>5$  mm soil water-stable aggregates, and has a prominent influence on the accumulation of big water-stable aggregates. The percentage of water-stable macroaggregate under the treatment of *Vicia villosa* Roth was highest. *Raphanus sativus* L. and *Vicia villosa* Roth were conducive to the promotion of mean weight diameter and geometric mean diameter of aggregate. Moreover, the percentage of aggregate destruction under green manure cultivation significantly decreased by 29%~38.17%. The percentage of aggregate destruction increased in the order: *Vicia villosa* Roth  $<$  *Raphanus sativus* L.  $<$  *Vicia cracca* L.  $<$  *Vicia sativa* L. The soil erodibility factor  $K$  under green manure cultivation has a certain influence and it shows that *Raphanus sativus* L.  $<$  *Vicia villosa* Roth  $<$  *Vicia sativa* L.  $<$  *Vicia cracca* L. Although the relation between soil erodibility factor  $K$  and green manure crop varieties was not significant, the relationship between soil erodibility factor  $K$  and soil aggregates was very close. The higher the water stable macroaggregate content was, the greater the mean weight diameter and geometric mean diameter was, the lower soil erodibility factor  $K$  and the percentage of aggregate destruction were, the better stability of the soil structure and erosion resistance were.

**Keywords:** soil aggregate; green manure; stability; erodibility

土壤团聚体是一种介于单粒和块状之间的土壤结构<sup>[1]</sup>,在生物与非生物单独或共同作用下,通过团聚和破碎交替过程而形成的<sup>[2]</sup>,它影响着土壤中的物质交换与能量平衡<sup>[3]</sup>,其数量和分布反映了土壤结构的机械稳定性和抗蚀性<sup>[4]</sup>,有研究认为土壤团聚体稳定性是影响侵蚀过程中土壤分离、搬运、水分入渗和结皮产生的重要因素<sup>[5-7]</sup>,土壤团聚度及团聚体的稳定性是决定和影响可蚀性最重要的土壤物理性质<sup>[8-9]</sup>,许多学者把土壤团聚体的水稳定性作为评价土壤可蚀性的重要指标,通过提高土壤水稳性团聚体的数量和质量来提高土壤的抗侵蚀能力<sup>[10-11]</sup>。而土壤团聚体主要受到施肥方式、种植制度和轮作方式等的影响<sup>[12]</sup>。研究表明添加玉米秸秆在显著增加黑土团聚体粒径 $>2$  mm 大团聚体含量的同时,还使其粒径 $<0.25$  mm 团聚体含量降低<sup>[13]</sup>。翻压绿肥后增加了土壤中 $>7$  mm 的大团聚体含量,降低了 $<1$  mm 的小团聚体的含量<sup>[14]</sup>。施有机肥可以直接促进 0.5~1 mm 粒径的水稳性团聚体的形成<sup>[15]</sup>。绿肥是我国农作物种植制度中重要的轮作倒茬作物,种植翻压绿肥可以提升土壤肥力、改善土壤结构,而对土壤团聚体的研究较少,因此,本次试验以几种不同的绿肥作物为研究对象,通过连续种植,分析土壤团聚体组成、直径以及稳定性、可蚀性  $K$  值特征,探讨种植不同绿肥对土壤团聚体的影响,为促进良好土壤团聚体结构,土壤资源的可持续利用提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2011 年起在贵州省农业科学院(106°07'E,

26°11'N)内连续种植 5 年,该区域海拔高度 1 100 m,属于亚热带湿润温和型气候,年平均气温为 15.3℃,年极端最高温度为 35.1℃,年极端最低温度为-7.3℃,年平均相对湿度为 77%,年平均总降水量为 1 129.5 mm,年平均日照时数为 1 148.3 h。试验区土壤类型为黄壤,成土母质为第四纪红色黏土残积物,土壤有机质 45.05 g/kg,全氮 1.88 g/kg,全磷 0.79 g/kg,全钾 14.21 g/kg,碱解氮 169.9 mg/kg,有效磷 18.3 mg/kg,速效钾 112.2 mg/kg,pH 值 5.58。

### 1.2 试验设计

试验共设置 5 个处理:CK(清耕)、箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.)、肥田萝卜(*Raphanus sativus* L.)、蓝花苕子(*Vicia cracca* L.)、毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth),种子均从国家种质资源库引进,小区面积 9 m<sup>2</sup>,随机区组排列,3 次重复。肥田萝卜为十字花科绿肥,其余品种为豆科绿肥,其中箭筈豌豆是野豌豆属,苕子是巢菜属。清耕为不栽种任何作物,田间管理方式与其他处理相同,绿肥以单作方式,采用点播法播种,每穴间距为 20~25 cm,深度为 1~3 cm,每穴为 5 粒种子,生长过程不施用任何肥料,每年 9 月间播种,次年 6 月收割地上部分,试验连续重复进行。

### 1.3 测定方法

于 2016 年 6 月待收割地上部分后在田间取样,采集 0~20 cm 耕层的土壤样品,每个小区分别取 3 个点的土壤作为该取样小区的样品。土壤基本理化性质<sup>[16]</sup>:土壤 pH 值采用水土比 2.5:1(pH 计法),全氮采用凯氏定氮法,全磷含量采用酸溶钼锑抗比色法,全钾采用 HF—HClO<sub>4</sub> 消解火焰光度法,有机质采用重铬酸钾容

量法,碱解氮用碱解扩散法一标准酸滴定,有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑钒比色法测定,速效钾采用 1.0 mol/L 的 NH<sub>4</sub>OAc 浸提—火焰光度法测定。

团聚体<sup>[17]</sup>:在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动,以免破坏团聚体。将采集的土样带回实验室内风干,沿土壤结构的自然剖面掰分成 1 cm 左右的团块,采用干筛法测定机械稳定性团聚体组成,湿筛法测定土壤水稳性团聚体组成,套筛由孔径分别为 5,2,1,0.5,0.25 mm 共 5 个筛子组成。

1.4 数据处理

$$PAD=\frac{A-WSA}{A}\times 100\%$$
 (1)

式中:PAD 为团聚体破坏率<sup>[18]</sup>;WSA 为>0.25 mm 水稳性团聚体的重量;A 为>0.25 mm 团聚体(干筛)的重量。

$$MWD=\sum_{i=1}^{n+1}\frac{r_{i+1}+r_i}{2}\times m_i$$
 (2)

式中:MWD 为平均重量直径<sup>[19]</sup>;m<sub>i</sub> 为各级团聚体的重量百分含量;r<sub>i</sub> 为第 i 个筛的孔径大小(mm),并且,r<sub>0</sub>=r<sub>1</sub>,r<sub>n</sub>=r<sub>n+1</sub>;n 为筛子的数量。

$$GMD=\exp\left\{\frac{\sum m_i\ln r_i}{\sum m_i}\right\}$$
 (3)

式中:GMD 为几何平均直径<sup>[20]</sup>;lnr<sub>i</sub> 为土壤粒级的平均直径的自然对数。土壤可蚀性因子 K 值<sup>[20]</sup>的计算公式如下:

$$K=7.954\times\left\{0.0017+0.0494\times\exp\left[-0.5\times\left(\frac{1.675+\lg GMD}{0.6986}\right)^2\right]\right\}$$
 (4)

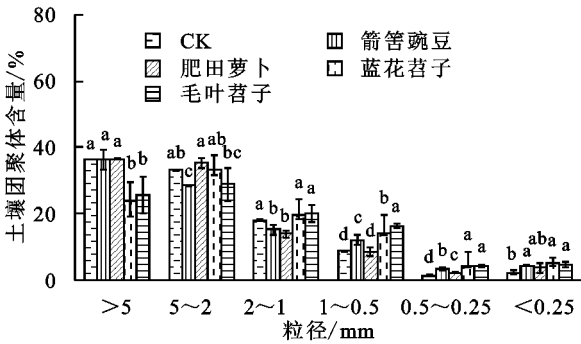
采用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较(α=0.05),用 Pearson 法进行相关分析。利用 Excel 2007 软件作图。图表中

数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同绿肥作物对土壤机械稳定性团聚体组成的影响

由图 1 与表 1 可以看出,各处理均以>0.25 mm 大团聚体为主,说明土壤团聚性较好,呈现粒径减小质量减小的趋势,以>5 mm,2~5 mm 粒径团聚体含量最高;>5 mm 与 1~2 mm,0.5~1 mm,0.25~0.5 mm 粒径的团聚体含量呈现极显著的负相关,2~5 mm 与 0.5~1 mm 粒径的团聚体含量呈现显著的负相关,1~2 mm 与 0.5~1 mm 粒径的团聚体含量呈现显著的正相关,0.5~1 mm 与 0.25~0.5 mm 粒径之间的团聚体含量均呈现极显著正相关。在不同绿肥作物中比较,>5 mm 粒径中,肥田萝卜最高,是蓝花苕子的 1.53 倍;2~5 mm 粒径中,肥田萝卜最高,是箭筈豌豆的 1.24 倍;1~2 mm 粒径、0.5~1 mm 粒径、0.25~0.5 mm 粒径中,毛叶苕子最高,这 3 个粒径中分别是肥田萝卜的 1.45,1.94,1.91 倍。可见,肥田萝卜主要提高>2 mm 粒径的团聚体,毛叶苕子、蓝花苕子主要提高 0.25~2 mm 粒径的团聚体。



注:不同小写字母表示在 p≤0.05 水平差异显著,下同。

图 1 不同处理的土壤机械稳定性团聚体含量

表 1 各粒径土壤机械稳定性团聚体含量相关性系数

粒径	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
>5 mm	1					
5~2 mm	-0.092	1				
2~1 mm	-0.843**	0	1			
1~0.5 mm	-0.741**	-0.584*	0.640*	1		
0.5~0.25 mm	-0.724**	-0.487	0.45	0.931**	1	
<0.25 mm	-0.487	-0.291	0.066	0.576*	0.773**	1

注:\*表示 p<0.05;\*\*表示 p<0.01,下表同。

2.2 不同绿肥作物对土壤水稳性团聚体组成的影响

由图 2 和表 2 可以看出,各处理均以>0.25 mm 水稳性大团聚体为主,以>5 mm 粒径水稳性团聚体含量最高,呈现粒径减小质量减小的趋势;各粒径间的团聚

体相关性较高,>5 mm 与<5 mm 粒径的团聚体含量呈现极显著负相关,而<5 mm 的粒径间含量呈现显著正相关。在不同绿肥作物中比较,>5 mm 粒径中,肥田萝卜最高,是蓝花苕子的 2.2 倍;2~5 mm,1~2 mm,0.5~

1 mm,0.25~0.5 mm 粒径中,蓝花苕子最高,这 4 个粒径中分别是肥田萝卜的 1.4,1.9,1.7,2.0 倍。可见,肥田萝卜主要提高了>5 mm 粒径的水稳性团聚体,而蓝花苕子主要提高了 0.25~5 mm 粒径的水稳性团聚体。

表 2 各粒径土壤水稳性团聚体含量相关性系数

粒径	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
>5 mm	1					
5~2 mm	-0.911**	1				
2~1 mm	-0.972**	0.930**	1			
1~0.5 mm	-0.964**	0.824**	0.908**	1		
0.5~0.25 mm	-0.854**	0.816**	0.791**	0.784**	1	
<0.25 mm	-0.675**	0.363	0.541*	0.701**	0.532*	1

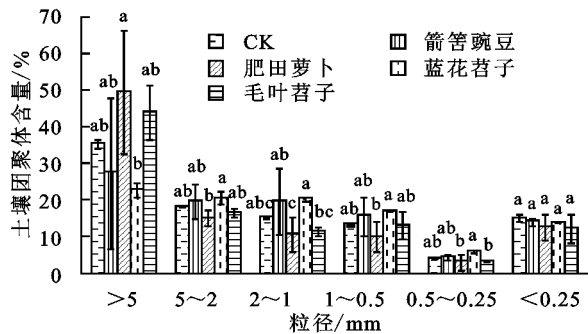


图 2 不同处理的土壤水稳性团聚体含量

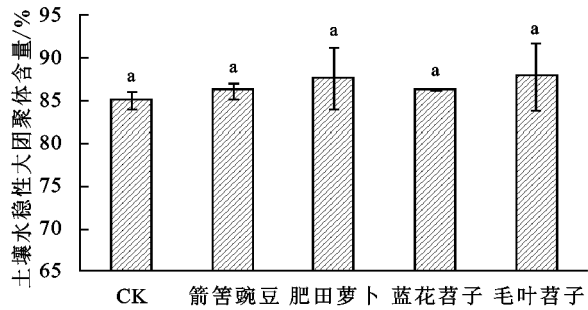


图 3 不同处理的土壤水稳性大团聚体含量

2.3 不同绿肥作物对土壤水稳性大团聚体含量的影响

由图 3 可以看出,清耕处理的水稳性大团聚体含

量为 85.06%,而连续种植绿肥的水稳性团聚体含量为 86.12%~87.79%,毛叶苕子的土壤水稳性大团聚体含量最高,肥田萝卜次之,种植绿肥作物促进土壤水稳性大团聚体的形成。总体上看,连续种植绿肥有利于形成土壤水稳性大团聚体,由图 4 和表 3 可以看出,>5 mm 土壤水稳性团聚体含量与土壤水稳性大团聚体含量极显著正相关,拟合方程为  $y=4.2563x-332.77$ ,  $R^2=0.4562$ ,说明>5 mm 粒级的土壤水稳性团聚体的增加对土壤水稳性大团聚体积累的影响较为突出。

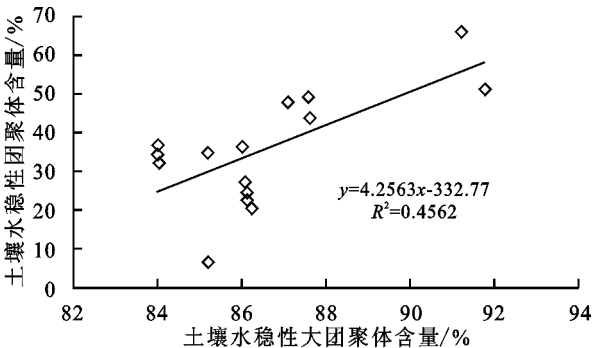


图 4 土壤水稳性团聚体含量与水稳性大团聚体含量的关系

表 3 土壤水稳性大团聚体含量与各粒径土壤水稳性团聚体含量相关性系数

项目	水稳性大团聚体	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm
水稳性大团聚体	1					
>5 mm	0.675**	1				
5~2 mm	-0.363	-0.911**	1			
2~1 mm	-0.541*	-0.972**	0.930**	1		
1~0.5 mm	-0.701**	-0.964**	0.824**	0.908**	1	
0.5~0.25 mm	-0.532*	-0.854**	0.816**	0.791**	0.784**	1

2.4 不同绿肥作物对土壤团聚体破坏率的影响

由图 5 可以看出,CK 的土壤团聚体破坏率为 12.98%,种植绿肥的土壤团聚体破坏率为 8.02%~9.91%,连续种植绿肥作物能够显著降低土壤团聚体破坏率,较 CK 显著降低了 29%~38.17%,毛叶苕子<肥田萝卜<蓝花苕子<箭筈豌豆,毛叶苕子的团聚体破坏率最低,比空白显著降低了 38.17%。

2.5 不同绿肥作物对土壤平均重量直径的影响

由图 6 可以看出,CK 的土壤平均重量直径为 2.72 mm,种植绿肥的土壤平均重量直径为 2.31~3.23 mm 肥田萝卜>毛叶苕子>CK>箭筈豌豆>蓝花苕子,肥田萝卜的土壤平均重量直径最大,比 CK 高 18.75%,比蓝花苕子显著高 40.16%,连续种植肥田萝卜、毛叶苕子有利于耕层土壤平均重量直径的提升。

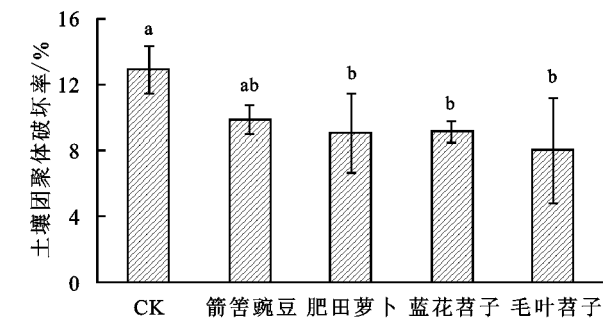


图 5 不同处理的土壤团聚体破坏率

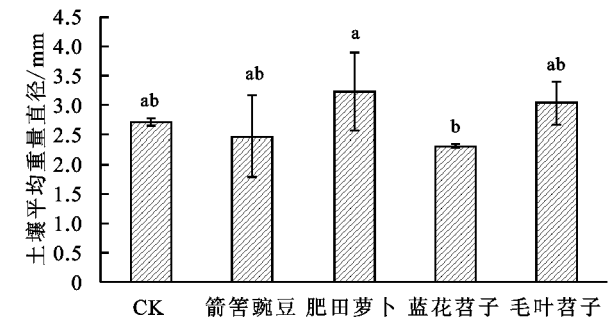


图 6 不同处理的土壤平均重量直径

2.6 不同绿肥作物对土壤几何平均直径的影响

由图 7 可以看出,CK 的土壤几何平均直径为 1.08 mm,连续种植绿肥的土壤几何平均直径为 0.87~1.23 mm,肥田萝卜>毛叶苕子>CK>箭筈豌豆>蓝花苕子,肥田萝卜的土壤几何平均重量直径最大,比 CK 高 14.16%,比蓝花苕子显著高 42.02%,连续种植肥田萝卜、毛叶苕子有利于耕层土壤几何平均重量直径的提升。

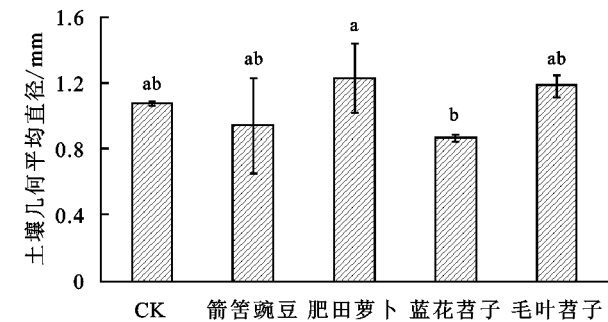


图 7 不同处理的土壤几何平均重量直径

2.7 土壤可蚀性因子 K 值特征

由图 8 可以看出,CK 的 K 值为 0.033,连续种植绿肥的 K 值为 0.030~0.041,连续种植绿肥对土壤可侵蚀因子(K)产生了一定的影响,但规律性不明显,不同绿肥作物之间的差异较大,肥田萝卜<毛叶苕子<箭筈豌豆<蓝花苕子,但未达到显著,肥田萝卜的 K 值最小,比蓝花苕子低 25.97%。

2.8 土壤团聚体组成、直径与土壤稳定性、可侵蚀性之间的关系

由图 9 和表 4 可以看出,四者之间有着紧密的联

系,通过分析发现,土壤平均重量直径与水稳性大团聚体含量之间极显著正相关,拟合方程为  $y=0.167x-11.701, R^2=0.5443$ ,土壤几何平均重量直径与水稳性大团聚体含量之间显著正相关,拟合方程为  $y=0.0511x-3.3618, R^2=0.3605$ ,土壤团聚体破坏率与水稳性大团聚体含量之间极显著负相关,拟合方程为  $y=-0.9155x+89.077, R^2=0.7815$ ,土壤团聚体破坏率与土壤平均重量直径显著负相关,拟合方程为  $y=0.0248x^2-0.5915x+6.0388, R^2=0.4076$ ,团聚体破坏率与几何平均直径呈负相关但未显著,水稳性大团聚体含量与 K 值之间呈现负相关但差异未显著。可见,土壤水稳性大团聚体含量越高,土壤平均重量直径、几何平均直径越大,团聚体破坏率越低,土壤结构的稳定性越好,且团聚体破坏率与土壤平均重量直径的相关性更强,另外,K 值与水稳性大团聚体含量呈负相关,与团聚体破坏率呈正相关未达到显著,与土壤团聚体直径(MWD,GMD)呈极显著的负相关,K 值与土壤直径相关性更强。

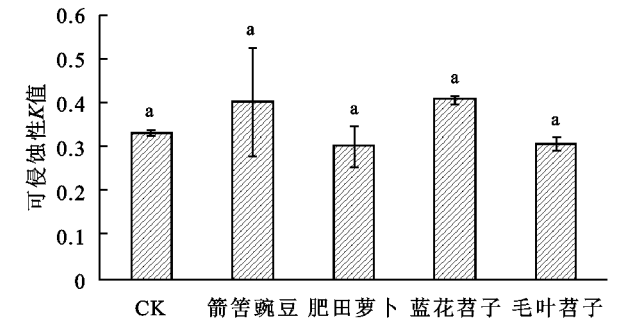


图 8 不同处理的土壤可侵蚀性 K 值

表 4 土壤团聚体与土壤稳定性、可侵蚀性的相关性系数

项目	水稳性大团聚体	PAD	MWD	GMD	K
水稳性大团聚体	1				
PAD	-0.884**	1			
MWD	0.738**	-0.515*	1		
GMD	0.599*	-0.373	0.980**	1	
K	-0.465	0.269	-0.912**	-0.963**	1

注:PAD 为土壤团聚体破坏率;MWD 为土壤平均重量直径;GMD 为土壤几何平均直径;K 为土壤可蚀性因子 K 值。

3 讨论

土壤团聚体主要受到施肥方式、种植制度和轮作方式等的影响<sup>[12]</sup>。土壤机械稳定性团聚含量的高低及组成情况是评价团聚体质量的重要指标<sup>[21]</sup>,而土壤水稳性团聚体数量反映了土壤结构的稳定性、持水性、通透性和抗侵蚀的能力,是评价团聚体抵抗外力破坏能力的重要指标<sup>[22]</sup>。有研究表明,秸秆

覆盖使  $>0.25$  mm 的土壤机械稳定性团聚体含量增加 13.0%~26.4%,  $>0.25$  mm 的土壤水稳性团聚体含量增加 8.6%~45.7%<sup>[23]</sup>。本次研究发现,连续种植绿肥能够提高不同粒径土壤机械稳定性、水稳性团聚体含量,肥田萝卜主要提高  $>2$  mm 粒径的机

械稳定性团聚体含量,毛叶苕子、蓝花苕子主要提高 0.25~2 mm 粒径的机械稳定性团聚体含量。同时,肥田萝卜主要提高了  $>5$  mm 粒径的水稳性团聚体含量,蓝花苕子主要提高了 0.25~5 mm 粒径的水稳性团聚体含量。

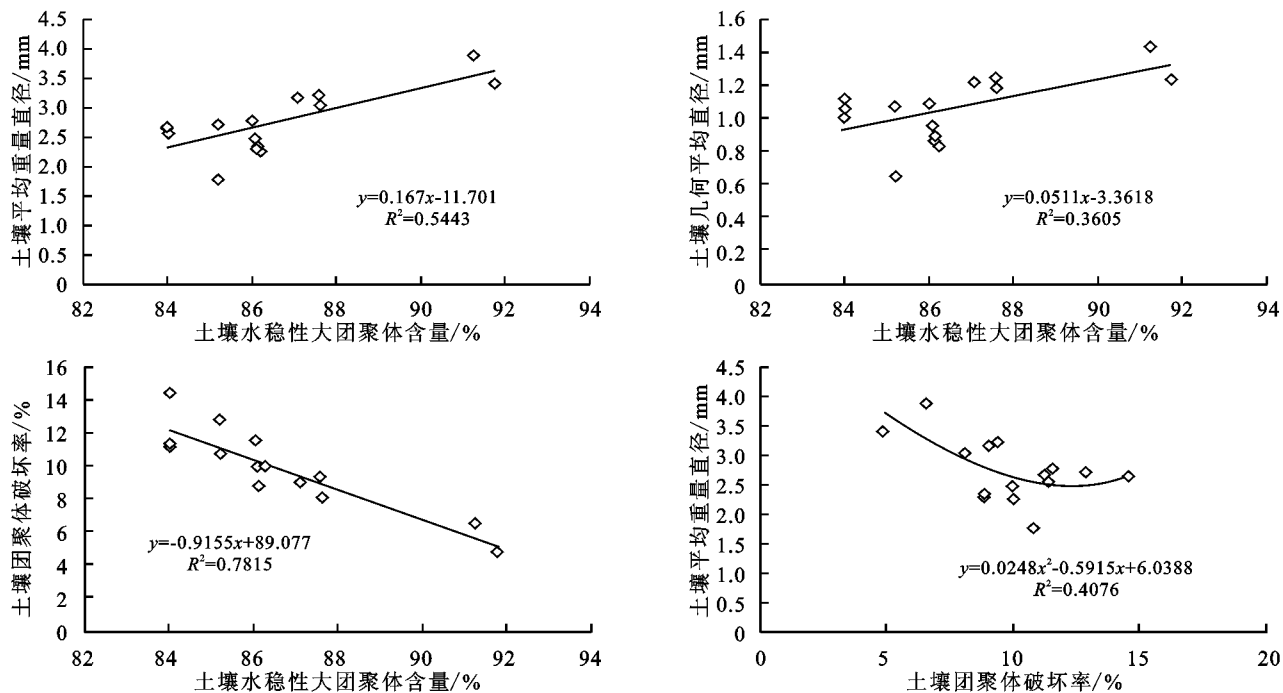


图 9 土壤团聚体与土壤稳定性之间的关系

按照颗粒大小,将  $>0.25$  mm 粒径的团聚体分为大团聚体<sup>[24]</sup>,它是由许多土粒多层次凝聚和多次胶结形成的,调节着土壤的水、肥、气、热<sup>[25]</sup>,其含量丰富是土壤良好结构特征的表现,衡量土壤结构性好坏和抗侵蚀性的一个最重要的指标就是大团聚体的含量。有研究表明,化肥与有机肥配施有利于大团聚体的形成,对 0.25~5 mm 水稳性大团聚体的促进作用最明显<sup>[26]</sup>。本次研究发现,连续种植绿肥有利于形成土壤水稳性大团聚体, $>5$  mm 粒级的土壤水稳性团聚体的增加对土壤水稳性大团聚体积累的影响较为突出。不同绿肥作物间比较,毛叶苕子的土壤水稳性大团聚体含量最高,肥田萝卜次之。

另外,土壤平均重量直径、几何平均直径反映了土壤团聚体大小分布状况,其值越大表征团聚体的平均团聚度越高,其稳定性也越好,是表征团聚体稳定性的一个重要指标<sup>[27-28]</sup>。有研究表明,紫花苜蓿和冰草均能显著提高土壤水稳性团聚体平均质量直径,高羊茅的作用不明显,总体表现为紫花苜蓿  $>$  冰草  $>$  高羊茅<sup>[29]</sup>。本次研究发现,连续种植绿肥对土壤平均重量直径、几何平均直径的影响差异较大,连续种植肥田萝卜、毛叶苕子有利于土壤平均重量直径和几何平均直径的提升,肥田萝卜  $>$  毛叶苕子  $>$  CK  $>$  箭筈豌豆  $>$  蓝

花苕子,肥田萝卜的土壤平均重量直径、几何平均直径分别比蓝花苕子显著高 40.16%,42.02%。

除此之外,团聚体破坏率表示土壤团聚体在水蚀作用下的分散程度,其值越小,土壤团聚体的稳定性越高,是表征团聚体稳定性的一个重要指标<sup>[27]</sup>。本次研究发现,连续种植绿肥作物能够显著降低土壤团聚体破坏率,较 CK 显著降低了 29%~38.17%,毛叶苕子  $<$  肥田萝卜  $<$  蓝花苕子  $<$  箭筈豌豆,毛叶苕子的团聚体破坏率比空白显著降低了 38.17%。而土壤团聚体稳定性与土壤侵蚀密切相关,是侵蚀的有效指示因子,可间接量化土壤可蚀性<sup>[30-31]</sup>。土壤可蚀性(K),是通用土壤流失方程<sup>[32]</sup>和修正通用土壤流失方程<sup>[33]</sup>中的重要因子,反映土壤对侵蚀外营力剥离和搬运的敏感性<sup>[34]</sup>,是评价土壤对侵蚀敏感程度和进行土壤侵蚀预报的重要参数<sup>[35]</sup>。本次研究表明,连续种植绿肥对 K 值产生了一定的影响,但规律性不明显,不同绿肥作物之间的差异较大,但未达到显著,肥田萝卜  $<$  毛叶苕子  $<$  箭筈豌豆  $<$  蓝花苕子,肥田萝卜的 K 值比蓝花苕子低 25.97%。虽然 K 值与不同绿肥作物间的规律不明显,但是其与土壤团聚体的关系很密切,有研究认为,湿筛团聚体指标 MWD,  $WSA_{0.25}$  值与侵蚀量和径流强度之间均呈显著负相关,可用该指

标衡量土壤可蚀性<sup>[30,36]</sup>,并且 MWD 能更好反映土壤团聚体稳定性与侵蚀产沙和产流间的关系<sup>[37]</sup>。本次研究发现,土壤水稳性大团聚体含量越高,土壤平均重量直径、几何平均直径越大,团聚体破坏率越低,土壤结构的稳定性越好,且团聚体破坏率与土壤平均重量直径的相关性更强,另外,  $K$  值与水稳性大团聚体含量呈负相关、与团聚体破坏率呈正相关未达到显著、与土壤团聚体直径(MWD, GMD)呈极显著的负相关,可见  $K$  值与土壤直径相关性更强。

## 4 结论

(1) 在土壤团聚体的组成上,连续种植绿肥能够提高不同粒径土壤机械稳定性、水稳性团聚体含量,肥田萝卜主要提高  $>2\text{ mm}$  粒径的机械稳定性团聚体含量、 $>5\text{ mm}$  粒径的水稳性团聚体含量,毛叶苕子、蓝花苕子主要提高  $0.25\sim 2\text{ mm}$  粒径的机械稳定性团聚体含量,蓝花苕子主要提高了  $0.25\sim 5\text{ mm}$  粒径的水稳性团聚体含量。同时,连续种植绿肥有利于形成土壤水稳性大团聚体( $>0.25\text{ mm}$ ),  $>5\text{ mm}$  粒级的土壤水稳性团聚体的增加对土壤水稳性大团聚体积累的影响较为突出。不同绿肥作物间比较,毛叶苕子的土壤水稳性大团聚体含量最高,肥田萝卜次之。

(2) 在土壤团聚体的直径上,连续种植绿肥对土壤平均重量直径、几何平均直径的影响差异较大,连续种植肥田萝卜、毛叶苕子有利于土壤平均重量直径和几何平均直径的提升,不同绿肥作物间比较,肥田萝卜  $>$  毛叶苕子  $>$  箭筈豌豆  $>$  蓝花苕子。

(3) 在土壤团聚体的稳定性上,连续种植绿肥作物能够显著降低土壤团聚体破坏率,较 CK 显著降低了  $29\%\sim 38.17\%$ ,不同绿肥作物间比较,毛叶苕子  $<$  肥田萝卜  $<$  蓝花苕子  $<$  箭筈豌豆。

(4) 在土壤可侵蚀性上,连续种植绿肥对土壤可侵蚀因子  $K$  值产生了一定的影响,但规律性不明显,不同绿肥作物之间的差异较大,但未达到显著,肥田萝卜  $<$  毛叶苕子  $<$  箭筈豌豆  $<$  蓝花苕子,肥田萝卜的  $K$  值比蓝花苕子低  $25.97\%$ 。

(5) 在土壤团聚体与土壤稳定性、可蚀性的相关性上,土壤水稳性大团聚体含量越高,土壤平均重量直径、几何平均直径越大,团聚体破坏率越低,土壤结构的稳定性越好,且团聚体破坏率与土壤平均重量直径的相关性更强,另外,可蚀性  $K$  值与水稳性大团聚体含量呈负相关、与团聚体破坏率呈正相关未达到显著、与土壤团聚体直径(MWD, GMD)呈极显著的负相关,可见可蚀性  $K$  值与土壤直径相关性更强。

## 参考文献:

- [1] 王涛,何丙辉,秦川,等.不同种植年限黄花生生物埂护坡土壤团聚体组成及其稳定性[J].水土保持学报,2014,28(5):153-158.
- [2] 蒲玉琳,林超文,谢德体,等.植物篱—农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征[J].应用生态学报,2013,24(1):122-128.
- [3] 于爱忠,黄高宝,柴强,等.耕作措施对冬小麦农田土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):119-123.
- [4] Lal R, Shukla M K. Principles of soil physics[M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [5] Abu-Hamdeh N H, Abo-Qudais A S A, Othman A M. Effect of soil aggregate size on infiltration and erosion characteristics[J]. European Journal of Soil Science, 2010,57(5):609-616.
- [6] Valmisi S, Dimoyiannis D, Danalatos N G. Assessing interrill erosion rate from soil aggregate instability index, rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece[J]. Soil & Tillage Research, 2005,80(1):139-147.
- [7] Zhang G S, Chan K Y, Oates A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007,92(1):122-128.
- [8] Young R A. Characteristics of eroded sediment[J]. Transactions of the ASAE, 1980,23(5):1139-1142.
- [9] Bryan R B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope[J]. Geomorphology, 2000,32(3):385-415.
- [10] 吴彦,刘世全,付秀琴,等.植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(1):45-49.
- [11] 马祥华,焦菊英,温仲明,等.黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中土壤物理特性变化研究[J].水土保持研究,2005,12(1):17-21.
- [12] 张宝军,唐崑,芦红超,等.土地利用方式对土壤大团聚体的影响[J].安徽农业科学,2013,41(12):5306-5308.
- [13] 关松,窦森,胡永哲,等.添加玉米秸秆对黑土团聚体碳氮分布的影响[J].水土保持学报,2010,24(4):187-191.
- [14] 倡国涵,赵书军,王瑞,等.连年翻压绿肥对植烟土壤物理及生物性状的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):905-912.
- [15] 崔荣美,李儒,韩清芳,等.不同有机肥培肥对旱作农田土壤团聚体的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(11):124-132.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [17] 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.
- [18] 刘文利, 吴景贵, 傅民杰, 等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 129-135.
- [19] 何淑勤, 郑子成, 宫渊波, 等. 不同退耕模式下土壤水稳性团聚体及其有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 229-233.
- [20] 曾全超, 李娅芸, 刘雷, 等. 黄土高原草地植被土壤团聚体特征与可蚀性分析[J]. 草地学报, 2014, 22(4): 743-749.
- [21] 王英俊. 生草对渭北苹果园土壤团聚体及其有机 C : N 的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [22] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. *Agronomy Journal*, 1936, 28(5): 337-351.
- [23] 王海霞, 孙红霞, 韩清芳, 等. 免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1025-1030.
- [24] 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.
- [25] 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 and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [26] 程乙, 任昊, 刘鹏, 等. 不同栽培管理模式对农田土壤团聚体组成及其碳、氮分布的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3521-3528.
- [27] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 112-115.
- [28] Salako F K, Hauser S. Influence of different fallow management systems on stability of soil aggregates in Southern Nigeria [J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2001, 32(9/10): 1483-1498.
- [29] 秦瑞杰, 郑粉莉, 卢嘉. 草本植物生长发育对土壤团聚体稳定性影响的试验研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 141-144.
- [30] 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.
- [31] 郭伟, 史志华, 陈利顶, 等. 红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2516-2522.
- [32] Wischmeier W H, Smith D D. A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning [J]. *Transactions Int. Congr. Soil Sci*, 1960, 1: 418-425.
- [33] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[Z]. *Agricultural Handbook*, 1997.
- [34] 郑海金, 杨洁, 喻荣岗, 等. 红壤坡地土壤可蚀性 K 值研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 425-428.
- [35] 梁音, 刘宪春, 曹龙熹, 等. 中国水蚀区土壤可蚀性 K 值计算与宏观分布[J]. 中国水土保持, 2013(10): 35-40.
- [36] 闫峰陵, 史志华, 蔡崇法, 等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 577-583.
- [37] 陈正发, 史东梅, 谢均强, 等. 紫色土旱坡地土壤团聚体稳定性特征对侵蚀过程的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(13): 2721-2729.

~~~~~

(上接第 8 页)

- [39] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 709-714.
- [40] Wei X, Reich P B, Hobbie S E, et al. Disentangling species and functional group richness effects on soil N cycling in a grassland ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(11): 4717-4727.
- [41] Wei X, Shao M, Fu X, et al. The effects of land use on soil N mineralization during the growing season on the northern Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2011, 160(3): 590-598.
- [42] Tischer A, Blagodatskaya E, Hamer U. Microbial community structure and resource availability drive the catalytic efficiency of soil enzymes under land-use change conditions [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 89: 226-237.
- [43] Zhao H, Zhang X, Xu S, et al. Effect of freezing on soil nitrogen mineralization under different plant communities in a semi-arid area during a non-growing season[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 45(3): 187-192.
- [44] 朱新萍, 贾宏涛, 郑春霞, 等. 高产棉田土壤碱性磷酸酶及脲酶空间变异特征分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 586-591.
- [45] 朱剑兴, 王秋凤, 何念鹏, 等. 内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6320-6327.
- [46] Wei X, Huang M, Shao M, et al. Shrubs increase soil resources heterogeneity along semiarid grass slopes in the Loess Plateau[J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, 88(1): 175-183.