

# 宁夏黄土丘陵区典型林草植被类型 对土壤水稳性团聚体的影响

陈国靖<sup>1</sup>, 蔡进军<sup>2</sup>, 马 璠<sup>2</sup>, 许 浩<sup>2</sup>, 董立国<sup>2</sup>, 韩新生<sup>2</sup>, 李生宝<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学 农学院, 银川 750021; 2. 宁夏农林科学院 荒漠化治理研究所, 银川 750002)

**摘 要:**土壤团聚体是土壤的基础单元结构,是研究土壤结构、抗侵蚀能力的重要指标。对宁夏黄土丘陵区典型林草植被类型下的水稳性团聚体进行了测定,分析了不同林草植被类型下土壤水稳性团聚体的差异。结果表明:(1)混交林地的水稳性大团聚体比例,MWD,GMD, $D$  值较山杏、山桃、沙棘等纯林大,说明混交林地土壤的结构最好,抗侵蚀能力最强;撂荒地的土壤水稳性团聚体稳定性的各指标值最小,土壤结构最差,抗侵蚀能力最差。(2) $>0.25$  mm 粒径水稳性团聚体含量林地大于撂荒地,上层土壤大于下层土壤,说明林地土壤结构较撂荒地稳定,上层土壤结构较下层稳定。(3)土壤分形维数  $D$  值苜蓿地大于林地,苜蓿地土壤受到人为因素后恢复年限短,土壤颗粒分散,土壤稳定性差。研究结果表明,林地——特别是混交林地土壤水稳性团聚体比苜蓿地和撂荒地好,对研究区土壤结构恢复有很好的效果。

**关键词:**黄土丘陵区;林草植被结构;土壤水稳性团聚体

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0049-05

## Effects of Typical Forest and Grass Vegetation Structure on Soil Water-Stable Aggregates in Hilly Loess Plateau of Ningxia Province

CHEN Guojing<sup>1</sup>, CAI Jinjun<sup>2</sup>, MA Fan<sup>2</sup>, XU Hao<sup>2</sup>, DONG Ligu<sup>2</sup>, HAN Xinsheng<sup>2</sup>, LI Shengbao<sup>2</sup>

(1. College of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** Soil aggregates are the basic unit structure of soils and are important indexes for studying soil structure and anti-erosion ability. In this paper, the water-stable aggregates under typical forest-grassland vegetation types in the loess hilly region of Ningxia were measured, and the differences of soil water-stable aggregates under different vegetation types were analyzed. The results showed that: (1) the ratio of water-stable macro-aggregates, MWD, GMD and  $D$  were higher in mixed forest than in pure forests such as *Prunus sibirica*, *Prunus davidiana* and *Hippophae rhamnoides*, which indicated that the structure of soil in mixed forest was the best, and the soil had the strongest anti-erosion ability; the index value of stability of soil water-stable aggregates in abandoned land was the lowest, the soil structure was the worst, and the erosion resistance was the lowest; (2) the content of  $>0.25$  mm water-stable aggregates was greater in woodland than abandoned wasteland, and the that of upper soil was larger than that of the lower soil, indicating that soil structure of forest land was more stable than that of wasteland and the structure of upper soil was more stable than deeper layer; (3) the value of soil fractal dimension  $D$  was higher in alfalfa than in woodland. The alfalfa soil had short recovery period, scattered soil particles and poor soil stability after being influenced by human activities. Based on the experimental results, it can be seen that soil—water—stable aggregates in forest lands, especially in mixed forests, are better than those in Alfalfa and wasteland, and have a good effect on soil structure recovery in the study area.

**Keywords:** loess hilly region; forest and grass vegetation structure; soil water stable aggregates

收稿日期:2017-11-11

修回日期:2017-12-04

资助项目:“十二五”国家科技支撑计划课题(2015BAC01B01);国家重点研发计划课题(2016YFC0501702);宁夏多功能林业分区域研究与示范项目(YES-16-12)

第一作者:陈国靖(1993—),女,内蒙古阿拉善人,硕士研究生,研究方向为黄土丘陵区流域生态修复。E-mail:595250858@qq.com

通信作者:蔡进军(1976—),男,宁夏平罗人,硕士研究生,副研究员,研究方向为黄土丘陵区流域生态修复。E-mail:nxyccai@163.com

土壤团聚体是土壤的基础结构单元<sup>[1-2]</sup>,是由土壤的物理、化学、生物三大特性综合作用产生,同时也影响着土壤的物理、化学、生物性状,如透气性、持水性等物理性质,对土壤中微生物的活动、酶活性以及土壤养分的存储等生物、化学性状也起到很大的作用。土壤水稳性团聚体是体现土壤抗侵蚀能力最好的指标<sup>[3]</sup>,通常用土壤水稳性团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数( $D$ )三大指标来评价土壤团聚体的稳定性<sup>[4]</sup>,且粒径 $>0.25$  mm的水稳性团聚体被看作是结构性最好的团聚体<sup>[5]</sup>,其含量越高表明土壤的抗侵蚀能力越强。

不同的土地利用方式对土壤团聚体的影响十分显著<sup>[6-7]</sup>,有研究表明灌丛、林地土壤的团聚体较农地土壤团聚体稳定;天然林地的土壤团聚体比人工林地团聚体含量高。董莉丽<sup>[8]</sup>对陕北黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体进行了分析,研究结果表明林地土壤 $>0.25$  mm水稳性团聚体质量分数、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)均比农地和果园大,土壤结构明显比农地好。

宁夏南部山区位于黄土高原西部,属于半干旱黄土梁状丘陵区,地形破碎、植被覆盖率较低,水土流失严重,生态系统脆弱。多年来,随着退耕还林还草、封山禁牧、天然林保护等生态治理工程的实施,生态环境明显改善,但受黄土高原特殊的地形地貌影响,水土流失仍然是该区域主要的生态问题。随着生态文明建设步伐加快,在揭示黄土高原区域生态系统演变规律和维持机制前提下,合理评价现有植被类型下的生态效果,阐明区域典型植被类型的水土保持效果,进而提出以控制土壤侵蚀为目的的林草结构优化技术,集成区域水土流失综合治理技术体系十分必要。本文以宁夏黄土丘陵区典型林草植被类型为研究对象,研究不同植被类型土壤团聚体的 MWD, GMD,  $D$  值对土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响,分析不同植被类型下土壤水稳性团聚体的差异,为评价该地区不同植被利用类型土壤结构及生态功能提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究地点位于宁夏彭阳县白阳镇中庄流域,处于彭阳县城东北方 21 km( $106^{\circ}41'—106^{\circ}45'E, 35^{\circ}51'—35^{\circ}55'N$ )。地貌类型属于梁状丘陵区,平均海拔在 1 600~1 700 m,温带大陆性气候,年平均气温  $7.6^{\circ}C$ ,年平均风速  $2.7$  m/s, $\geq 10^{\circ}C$ 的积温为  $2\ 200—2\ 750^{\circ}C$ ,无霜期 140~160 d。流域多年平均降水量 420~500 mm,降水量集中且分配不均,主要集中在 7—9 三个月,且降水的年际变差系数较大,常以暴雨形式出

现,易发生局部地区洪水。土壤类型以普通黑垆土为典型土壤,土壤母质为黄土及黄土状物,pH 值在 8~8.5,土层深厚,土质疏松。流域地带性植被类型为干草原类,主要分布有长芒草(*Stipa bungeana* Tri.)、百里香(*Thymus quinquecostatus* Celak.)、西山委陵菜(*Potentilla sishanensis* Bge. ex Lehm.)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis* L.)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* (Laxm.) Schindl)等草本植物。其次还有中生和旱中生的落叶阔叶灌丛、落叶阔叶林、草甸。人工林草植物主要包括山桃(*Prunus davidiana* Franch.)、山杏(*Prunus sibirica* L.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.)等。

## 2 研究方法

### 2.1 植被类型选择

选择当地具有代表性的林草植被类型山桃林、山杏林、沙棘林、苜蓿地、山杏×柠条混交林、撂荒地,其中林地均为人工林地,山杏、山桃、沙棘是人工纯林,山杏×柠条是人工混交林地,均为 2007 年左右栽种,种植年限基本一致,苜蓿地为无人刈割的弃耕苜蓿地,撂荒地为弃耕 10 a 以上的农地(表 1)。

表 1 不同林草植被结构的基本信息

林草植被结构	经度 E	纬度 N	坡向	海拔	坡度
山桃林	106.72231°	35.95579°	半阳坡	1709	23°
山杏林	106.75874°	35.94965°	半阳坡	1733	23°
沙棘林	106.72436°	35.94177°	半阳坡	1690	17°
山杏×柠条混交林	106.62855°	35.85135°	半阳坡	1703	26°
苜蓿地	106.72117°	35.93957°	半阳坡	1618	—
撂荒地	106.71683°	35.95422°	半阳坡	1694	—

### 2.2 土样的采集

于 2016 年 9 月在中庄小流域,山桃林、山杏林、沙棘林、苜蓿地、山杏×柠条混交林、撂荒地每个样地选取 6 个点,每个点均分 5 层采样,即 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 土壤层次,采集原状土样,每层取 3 个重复。装入铝盒避免挤压,尽量保持土样的原状性,带回实验室,风干后待测。

### 2.3 水稳性团聚体的测试方法

本研究采用 Yoder 湿筛法对水稳性团聚体含量进行测定。测定所用主要设备为日本产 DIK-2001 型土壤团粒分析仪,其套筛孔径依次为 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.106 mm。每组样品测定的震荡时间为 30 min,震荡结束后分别将各级筛子上的团聚体用清水冲洗到碗中,再将碗中的各级团聚体冲入已烘干称重的滤纸中进行过滤,待过滤完后将带有

团聚体的滤纸收起来放入烘箱烘干后称取各级团聚体的重量。

2.4 计算方法

(1) 水稳性团聚体的土壤平均重量直径(MWD)

$$MWD=\sum x_i \frac{m_i}{\sum m_i}$$
 (1)

式中: $x_i$  为土壤粒级的平均直径(mm); $m_i$  为土壤不同粒级团聚体的质量(g)。

(2) 水稳性团聚体的土壤几何平均直径(GMD)

$$GMD=\exp\left\{\frac{\sum m_i \ln x_i}{\sum m_i}\right\}$$
 (2)

式中: $m_i$  为土壤不同粒级团聚体的质量(g); $\ln x_i$  为土壤粒级平均直径的自然对数。

(3) 水稳性团聚体的分形维数(D)

土壤团聚体的质量分形维数(D)是基于假设不同粒级的土壤密度相同提出来的。公式如下:

$$\frac{M(r<\overline{x_i})}{M_T}=(\frac{\overline{x_i}}{x_{\max}})^{3-D}$$
 (3)

表 2 不同林草植被结构下土壤的水稳性团聚体分布特征

林草植被	各粒级土壤水稳性团聚体的质量百分比/%				
	>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.106~0.25 mm
山杏	14(2)bc	7(2)a	7(1)a	6(1)a	10(1)b
山桃	15(8)b	4(3)b	4(3)ab	5(3)a	16(6)a
沙棘	12(4)bc	5(2)ab	4(2)ab	5(2)a	17(6)a
苜蓿	10(4)bc	3(2)b	3(2)b	4(3)a	18(2)a
混交	27(9)a	4(1)b	3(1)b	4(1)a	16(5)a
撂荒	8(4)c	5(3)b	6(4)ab	7(4)a	16(4)a

注:括号内数字为标准差,小写字母表示  $p<0.05$  水平下的差异性。

3.2 不同土层深度>0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量

通常>0.25 mm 的土壤团聚体称为大团聚体,是最稳定、最好的结构体,对于土壤的水肥热状况有很大的影响<sup>[9-10]</sup>。由表 3 可以看出,各林草植被类型下,土壤>0.25 mm 团聚体随土层深度的增加逐渐减少;0~20cm

表 3 不同土层深度土壤的水稳性大团聚体所占比例

土层/cm	>0.25 mm 土壤水稳性团聚体的质量百分比/%					
	山杏	山桃	沙棘	苜蓿	混交	撂荒
0—20	56(78)ab	61(12)ab	56(12)ab	47(17)bc	67(15)a	41(10)c
20—40	50(17)ab	38(26)abc	35(18)bc	18(15)c	60(18)a	25(20)c
40—60	33(9)a	20(16)ab	18(10)ab	13(18)b	36(23)a	21(16)ab
60—80	23(14)a	13(12)a	11(7)a	8(8)a	18(17)a	21(18)a
80—100	10(8)a	9(8)a	8(7)a	18(29)a	10(4)a	16(13)a

注:卑鄙号内数字为标准差,小写字母代有  $p<0.05$  的差异性。

3.3 土壤水稳性团聚体平均重量直径、几何平均直径和分形维数差异

土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体稳定性的重要指标。其值越大,土壤团聚体越稳定,土壤抗侵蚀能力越强;土壤水稳性团聚体分形维数 D 越大,土壤结构的稳定性越差<sup>[11-12]</sup>。由图

两边取以 10 为底的对数:

$$\lg[\frac{M(r<\overline{x_i})}{M_T}]= (3-D)\lg \frac{\overline{x_i}}{x_{\max}}$$
 (4)

式中: $M(r<\overline{x_i})$  为直径小于 $\overline{x_i}$ 的团聚体的质量(g); $M_T$  为团聚体总质量(g); $\overline{x_i}$  为某级团聚体的平均直径(mm); $x_{\max}$  为团聚体的最大直径(mm)。

3 结果与分析

3.1 不同林草植被类型水稳性团聚体分布特征

由表 2 可以看出,各林草植被类型下各粒径土壤团聚体含量均呈现先下降后上升的变化趋势,即>2 mm 和 0.106~0.25 mm 粒径的土壤团聚体含量所占比例较高。混交林>2 mm 粒径的水稳性团聚体含量最多,撂荒地的含量最少,其他粒径团聚体含量分布较为均匀,没有明显的变化规律。通过方差分析表明,各林草植被类型间<0.5 mm 土壤水稳性团聚体的分布基本无显著差异( $p<0.05$ )。

土层深度不同林草植被类型土壤>0.25 mm 水稳性团聚体所占比例为混交林地最高,撂荒地最少,分别是 0.67,0.41;各林草植被类型下>0.25 mm 水稳性团聚体含量为混交>山杏>山桃>沙棘>撂荒>苜蓿。通过方差分析表明,各林草植被类型间土壤水稳性大团聚体在土层深度>60 cm 后基本无显著差异( $p<0.05$ )。

1A、B 看出,混交林地的土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD 值均比其他类型大,图 1C 可以看出混交林地分形维数 D 值明显小于其他林草植被类型说明混交林地的团聚体稳定性最好。而苜蓿地和撂荒地的 MWD,GMD 值较其他林地略小,D 值较其他林地略大,说明苜蓿地和撂荒地的土壤结构稳定性较差,土

壤恢复不够好。

根据方差分析显示,各林草植被类型之间差异基本不显著,各土层深度之间,0—60 cm 深度差异显著,>60 cm 差异基本不显著(差异显著水平  $p < 0.05$ )。

### 3.4 土壤容重及土壤水稳性团聚体各参数之间的相关性

通过土壤容重(SBD)及水稳性团聚体各参数之

间的相关性来评价土壤的结构稳定性。如表 4 所示,土壤水稳性团聚体分形维数  $D$  值与 MWD, GMD、>2 mm 呈极显著负相关,相关系数分别为  $-0.98$ ;  $-0.99$ ,  $-0.98$ , MWD, GMD 与 >2 mm 呈极显著正相关,相关系数为  $0.95$ ,  $0.98$ , 对土壤结构稳定性贡献最大。MWD 与 GMD 呈极显著正相关,相关系数为  $0.99$ 。

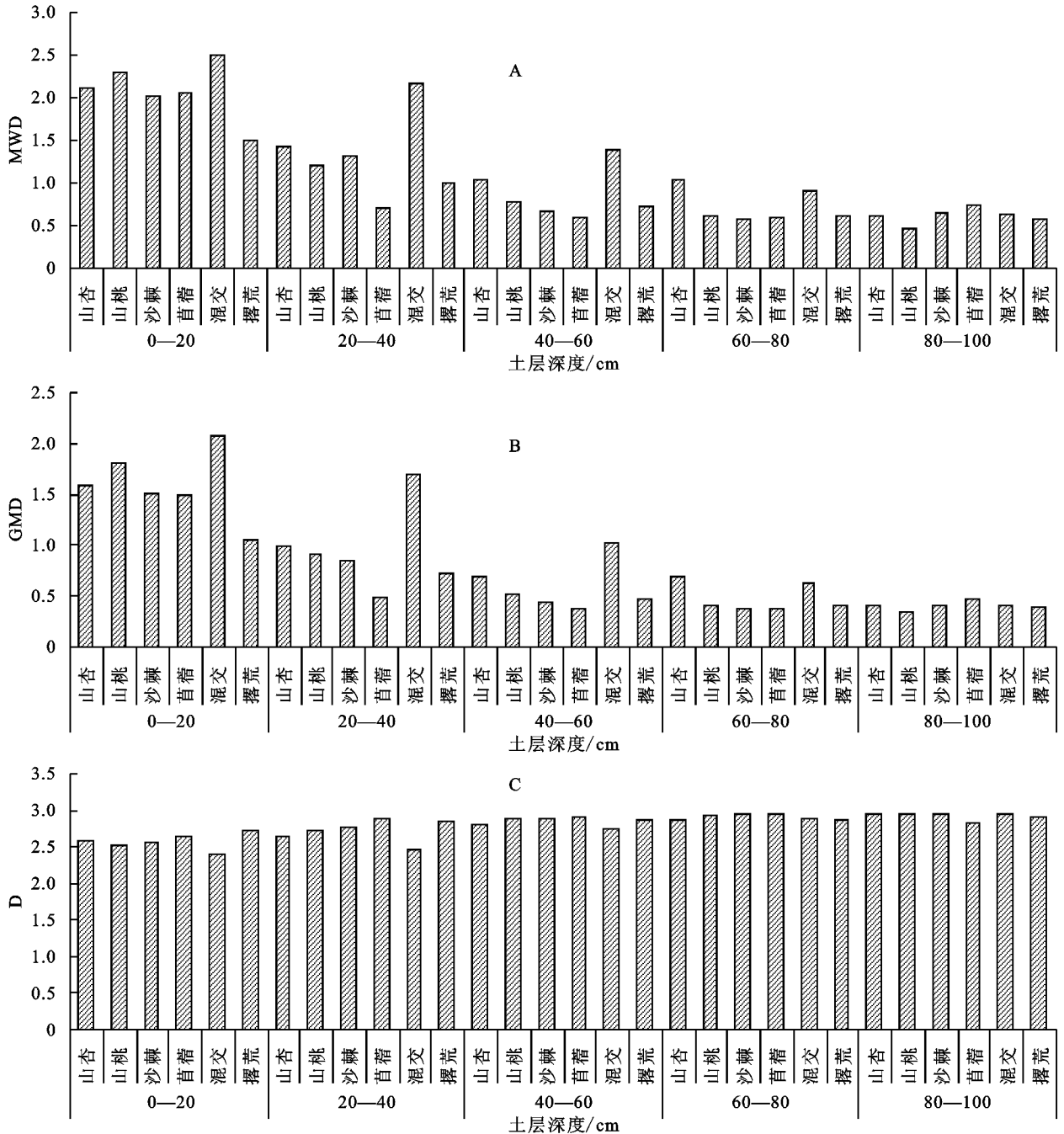


图 1 土壤水稳性团聚体稳定性指标

## 4 讨论

土壤团聚体是土壤最基本的结构单元,其中团聚体的质量和数量对土壤的肥力和性质起到了决定性的作用,对土壤的持水性、通透性和孔隙性也有很

大的影响,且决定了土壤的抗侵蚀能力<sup>[1-3]</sup>。粒径 >0.25 mm 的水稳性团聚体被看作是结构性最好的团聚体<sup>[5]</sup>,其数量越多,土壤的抗蚀能力越强。刘艳<sup>[13]</sup>、吕文星<sup>[14]</sup>等的研究表明相同林地不同深度的土层下,土壤 >0.25 mm 粒径的水稳性团聚体颗粒

随着土层深度逐渐减少,丁文峰<sup>[15]</sup>等对林地及农地土壤的团粒结构进行了研究,结果表明 $>0.25\text{ mm}$ 粒径的团聚体含量越高,则土壤的稳定性越好。本研究结果表明:各林草植被结构下,土壤 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体随土层深度的增加逐渐减少, $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量混交林最高,苜蓿地、撂荒地相对较少,其含量依次为混交 $>$ 山杏 $>$ 山桃 $>$ 沙棘 $>$ 撂荒 $>$ 苜蓿。说明混交林地土壤团粒结构较好,主要是因为混交林地物种较其他单一林地丰富,凋落物、枯死的细根归还量大,为土壤输入了大量的有机质,提供了促

进土壤团粒结构形成的有机胶结物质,从而有效地改善了土壤结构,增加了土壤中的团粒结构<sup>[16]</sup>;人工纯林物种单一,凋落物和枯死细根的归还量要显著小于混交林<sup>[17]</sup>。 $<0.25\text{ mm}$ 粒径的水稳性团聚体随着土层深度反而增加,说明上层土壤受到根系、枯落物的影响较大,土壤结构稳定;土层越深,团聚体粒径就越小,因为越往下根系对土壤的影响就越小。表层土壤大团聚体含量最大的是混交林地,最少的是撂荒地,可能是因为撂荒地恢复不彻底,还没有恢复到被破坏前的水平。

表 4 土壤容重及水稳性团聚体各参数之间的相关性分析

指标	SBD	MWD	GMD	<i>D</i>	$>2\text{ mm}$	$1\sim2\text{ mm}$	$0.5\sim1\text{ mm}$	$0.25\sim0.5\text{ mm}$	$0.106\sim0.25\text{ mm}$
SBD	1	-0.55	-0.52	0.43	-0.46	-0.03	0.38	0.82*	0.15
MWD		1	0.99**	-0.98**	0.95**	0.17	-0.22	-0.58	-0.39
GMD			1	-0.99**	0.98**	0.09	-0.28	-0.58	-0.32
<i>D</i>				1	-0.98**	-0.13	0.21	0.48	0.36
$>2\text{ mm}$					1	-0.01	-0.36	-0.57	-0.19
$1\sim2\text{ mm}$						1	0.87*	0.45	-0.92**
$0.5\sim1\text{ mm}$							1	0.81*	-0.77*
$0.25\sim0.5\text{ mm}$								1	-0.3
$0.106\sim0.25\text{ mm}$									1

注: \*\* 为 0.01 水平上显著相关, \* 为 0.05 水平上显著相关。

土壤分形维数(*D*)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)是反映土壤水稳性团聚体的含量对土壤结构及其稳定性影响的趋势。*D*, MWD, GMD 3 个指标均可作为土壤水稳性团聚体稳定性的评价指标,其中分形维数 *D* 既可以反映土壤颗粒的大小,还能反映土壤质地的均一程度<sup>[4]</sup>。分形维数 *D* 值越大,团聚体的分散度越大,土壤结构稳定性越差。本研究结果表明:苜蓿地的 *D* 值明显比其他土地高,主要原因是前期耕作、播种等人为干扰较大,对土壤的团聚体破坏大,覆盖率低,受到雨水冲刷等自然因素影响较大,后无人刈割后恢复年限短,还没有恢复到被破坏前的状态;混交林地的 *D* 值最小。不同林草植被类型下的土壤分形维数 *D* 值维持在 2.71~2.89,与安韶山<sup>[18]</sup>等对云雾山草原自然保护区的土壤分形维数研究值(2.75~2.86)基本一致。

方差分析结果显示,不同林草植被类型相同土层深度的 MWD, GMD, *D* 值在 0—60 cm 深度范围内均呈显著性差异,60 cm 以下各林草植被类型土壤水稳性团聚体稳定性的各指标差异不显著,深层土壤受到根系、枯落物的影响小,土层深度越深,土壤中的有机质含量越少,微生物活动越少,对土壤颗粒的影响很小。

MWD, GMD 值最大,土壤的结构最好,抗侵蚀能力最强,撂荒地的土壤水稳性团聚体稳定性的各指标值最小,土壤结构最差,抗侵蚀能力最差。

(2) 土壤分形维数 *D* 值苜蓿地、撂荒地大于林地,苜蓿地土壤受到人为因素干扰后恢复年限短,土壤颗粒分散,土壤稳定性差。

(3) 植被对土壤水稳性团聚体的影响一般在 0—60 cm 深度范围内, $>60\text{ cm}$  影响较小。

参考文献:

[1] Six J, Bossuyt H, Degryze D, et al. A history of research on the link between(micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil & Tillage Research, 2004,79(1):7-31.

[2] 何淑勤,郑子成,杨玉梅. 茶园土壤团聚体分布特征及其对有机碳含量影响的研究[J]. 水土保持学报,2009,23(5):187-190.

[3] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses [J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936,28:337-351.

[4] 黎宏祥,王彬,王玉杰,等. 不同林分类型对土壤团聚体稳定性及有机碳特征的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016,38(5):84-91.

[5] 高维森. 土壤抗蚀性指标及其适用性初步研究[J]. 水土保持学报,1991,5(2):60-65.

5 结论

(1) 混交林地的 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性大团聚体、

- 护的农产品安全生产服务体系现状及改进建议:以山东桓台县为例[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(1): 1-6.
- [14] 刘光栋, 吴文良, 刘仲兰, 等. 华北农业高产粮区地下水面源污染特征及环境影响研究:以山东省桓台县为例[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 125-129.
- [15] 赵桂慎, 姜浩如, 吴文良. 高产粮区农田生态系统可持续性的能值分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 318-323.
- [16] Liu Y, Li S Q, Chen F, et al. Soil water dynamics and water use efficiency in spring maize (*Zea mays* L.) fields subjected to different water management practices on the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(5): 769-775.
- [17] 王红丽, 张绪成, 宋尚有. 半干旱区旱地不同覆盖种植方式玉米田的土壤水分和产量效应[J]. 植物生态学报, 2011, 35(8): 825-833.
- [18] 李全起, 房全孝, 陈雨海, 等. 底墒差异对夏玉米耗水特性及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 93-96.
- [19] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 不同施肥方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 195-200.
- [20] 陈刚, 王璞, 陶洪斌, 等. 有机无机配施对旱地春玉米产量及土壤水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 139-144.
- [21] 孙景生, 康绍忠, 王景雷, 等. 沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 20-24.
- [22] 吴永成, 王志敏, 周顺利.  $^{15}\text{N}$  标记和土柱模拟的夏玉米氮肥利用特性研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(12): 2446-2453.
- [23] Yang X, Lu Y, Ding Y, et al. Optimising nitrogen fertilisation: A key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008—2014) [J]. Field Crops Research, 2017, 206: 1-10.
- [24] 彭正萍, 刘亚男, 李迎春, 等. 持续氮素调控对小麦/玉米轮作系统氮素利用和表观损失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 74-79.
- [25] 云鹏, 高翔, 陈磊, 等. 冬小麦—夏玉米轮作体系中不同施氮水平对玉米生长及其根际土壤氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 567-574.
- [26] 马冬云, 郭天财, 宋晓, 等. 尿素施用量对小麦根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5222-5228.
- [27] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5502-5511.

~~~~~

(上接第 53 页)

- [6] 林培松, 高全洲. 不同土地利用方式下紫色土结构特性变化研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 134-138.
- [7] 王艳玲, 王燕, 李凌宇, 等. 成土母质与利用方式双重影响下红壤团聚体的组成特征与稳定性研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 776-785.
- [8] 董莉丽. 不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征[J]. 林业科学, 2011, 47(4): 95-100.
- [9] 袁德玲, 张玉龙, 唐首锋, 等. 不同灌溉方式对保护地土壤水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 125-128.
- [10] 袁俊吉, 蒋先军, 胡宇, 等. 不同植被覆盖对养分在土壤水稳性团聚体中分布特征的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 112-117.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 刘艳, 查同刚, 王伊琨, 等. 北京地区栓皮栎和油松人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 607-613.
- [14] 吕文星, 张洪江, 王伟, 等. 重庆四面山不同林地土壤团聚体特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 192-197.
- [15] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J]. 地理研究, 2002, 21(6): 700-706.
- [16] 毛艳玲, 杨玉盛, 邢世和, 等. 土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 132-137.
- [17] 徐灿, 张平仓, 丁文峰. 晋西黄土丘陵区不同农作物用地土壤团粒稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(3): 35-39.
- [18] 安韶山, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J]. 中国水土保持科学, 2008, 1(2): 66-70.