

# 黑土区杨树农田防护林土壤团聚体的稳定性

孙家兴, 赵雨森, 辛颖, 张军

(东北林业大学 林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** [目的] 探究黑土区不同密度下杨树农田防护林带对林下土壤结构的影响, 为合理配置当地农田防护林的栽植密度提供参考。[方法] 以黑龙江省拜泉县株行距分别为  $1.5\text{ m} \times 1\text{ m}$ ,  $2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ,  $3\text{ m} \times 1.5\text{ m}$  的不同密度杨树农田防护林带为研究对象, 弃耕地作为对照, 分析不同密度下不同径级团聚体的百分含量、团聚体破坏率(PAD)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)以及分形维数( $D$ )。[结果] ①各样地均表现为表层团聚体破坏率(PAD)最低, 林带的存在降低了深层土壤的团聚体破坏率(PAD)。随着林带密度的降低, 团聚体破坏率(PAD)整体呈现下降趋势。②平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)均随密度的降低而降低, 随土层深度的增加而降低, 各林带与对照之间差异显著( $p < 0.01$ )。③非水稳性团聚体分形维数和水稳性团聚体分形维数在  $0\text{—}20\text{ cm}$  土层随密度的减小而减小, 在  $20\text{—}60\text{ cm}$  土层随密度的减小而增大。[结论] 林带下土壤结构总体优于弃耕地, 林带增加了土壤黏粒含量, 增强了深层土壤稳定性。林带密度越大, 对土壤的改良作用越明显, 但会增大表层土壤的团聚体破坏率。

**关键词:** 农田防护林; 土壤团聚体稳定性; 平均质量直径; 几何平均直径; 分形维数; 团聚体破坏率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)03-0066-08

中图分类号: S152.4

**文献参数:** 孙家兴, 赵雨森, 辛颖, 等. 黑土区杨树农田防护林土壤团聚体的稳定性[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 66-73. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.011. Sun Jiaying, Zhao Yusen, Xin Ying, et al. Soil aggregate stability of poplar farmland shelter belts in black soil region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 66-73.

## Soil Aggregate Stability of Poplar Farmland Shelter Belts in Black Soil Region

SUN Jiaying, ZHAO Yusen, XIN Ying, ZHANG Jun

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the effects of poplar farmland shelter belts on the structure of soil under forest in order to provide guidance for rational allocation of tree planting density in black soil region. [Methods] This study investigated soil aggregate and analyzed the aggregates contents, percentage of aggregate disruption, mean weight diameter, geometric mean diameter and fractal dimension stability based on different space ( $1.5\text{ m} \times 1\text{ m}$ ,  $2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ,  $3\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ) in Baiquan County, Heilongjiang Province. Abandoned farmland was taken as control treatment. [Results] ① The percentage of aggregate disruption (PAD) of surface soil was the lowest and the percentage of aggregate disruption decreased with the decrease of forest belt density. The percentage of aggregate disruption in forest belt was less than control. ② With the increase of soil depths, mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) decreased. There was a significant difference between forest belt and control ( $p < 0.01$ ). ③ At  $0\text{—}20\text{ cm}$  depth, the dry-aggregates fractal dimension ( $D$ ) and water-stable aggregates fractal dimension ( $D$ ) decreased with the decrease of forest density, while an opposite trend was showed at  $20\text{—}60\text{ cm}$  depth. [Conclusion] The structure of soil under the forest belt is better than the abandoned farmland. The forest belt increases soil clay content and enhances the stability of the deep soil. As the increase of forest belt density, the soil under forest will be improved

收稿日期: 2017-11-27

修回日期: 2018-01-18

资助项目: 林业公益性行业科研专项“东北黑土区林业生态工程构建技术集成与示范”(201404202-01)

第一作者: 孙家兴(1992—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail: sunjiaying92@163.com.

通讯作者: 赵雨森(1957—), 男(汉族), 内蒙古自治区阿荣旗人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail: zhaoy1957@163.com.

effectively, but the aggregate disruption in surface soil will be increased.

**Keywords:** farmland shelter-belt; soil aggregate stability; mean weight diameter (MWD); geometric mean diameter(GMD); fractal dimension; percentage of aggregate disruption

农田防护林在充分利用水热资源、改善小气候、提高作物产量等方面发挥着巨大的作用。农田防护林的存在降低了风速,防止了风剥现象,增加了田间空气湿度,改良了土壤理化性质,改善了土壤结构,减少了水土流失,增强了土地的长期生产力<sup>[1]</sup>。

土壤结构是指土壤中所包含的不同大小、形状、孔隙度和水稳性及非水稳性团聚体的总和,可以综合反映土壤的肥力状态。土壤团聚体即为良好的土壤结构,指土粒通过各种自然过程的作用而形成的直径小于 10 mm 的结构单位,良好的团聚结构能够更好地调节植物对水养气的需要,有效防止水土流失,促进植物生长<sup>[2]</sup>。土壤团聚体稳定性是土壤生物、化学和物理过程共同作用的结果<sup>[3]</sup>,有机质、微生物、植被覆盖情况、土地利用类型和气候条件等都会对其造成影响<sup>[4-5]</sup>,侵蚀过程中的土壤分离、搬运更是与团聚体稳定性息息相关<sup>[3]</sup>。土壤团聚体稳定性和林龄具有很强的相关性,尤其是对表层土壤<sup>[4]</sup>,林带密度对土壤团聚体的影响仍然需要进行深入研究。

黑龙江省黑土区以农业生产为主,春秋两季干燥且风大,夏季降雨集中,建设有大量的农田防护林。其中由小黑杨(*Populus × xiaohei*)构成的农田防护林现在多数已为成、过熟林。以往关于农田防护林的研究多集中在防护林的建设以及胁地问题上,对于防护范围内的田间土壤研究较多,关于防护林自身的研究则较少,关于团聚体稳定性的研究多集中在不同土地利用方式和不同耕作模式下<sup>[6-9]</sup>,关于不同密度下的团聚体稳定性研究则较少。为了解农田防护林带对土壤结构以及土壤养分的影响,本文拟探究黑土区不同密度下杨树农田防护林带对林下土壤结构的影响,以弃耕地为对照,对农田防护林土壤团聚体的稳定性、不同密度农田防护林带内土壤团聚体的分布特征以及含量变化进行分析研究,以期为当地防护林的栽植密度提供参考,为农田防护林的可持续性提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于世界 3 大黑土区之一的东北黑土区,黑龙江省中部偏西的齐齐哈尔市拜泉县丰产乡长安村(125.76 E,47.64 N)。属中温带大陆性季风气候,

土质肥沃、雨热同期,年均降雨量 490 mm,年均积温 2 454.5 °C,年均日照 2 730 h,无霜期 122 d<sup>[10]</sup>。有利于多种农作物生长,主要粮食作物有玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)等。小黑杨(*Populus × xiaohei*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)等为当地农田防护林的主要构成树种,具有一定的代表性。

### 1.2 样地选择及取样方法

2016 年 6 月选定 3 条有代表性的小黑杨农田防护林带,株行距分别为 3 m×1.5 m,2 m×1.5 m,1.5 m×1 m,以弃耕 30 a 的无林地作为对照。在选定的林带内分别设置 3 个取样点,其中第一个取样点位于林带中间株行距的交叉点上,其他 2 个取样点分别在其两侧距离 27 m 处,共计 12 个。每个取样点分 4 层,取样深度为 0—10,10—20,20—40,40—60 cm。每层用 100 cm<sup>3</sup> 环刀取原状土测定土壤容重,同时用铝盒取土壤样品,每层 3 个重复,并用塑料盒取原状土带回,将同一样地不同取样点的同一层土样混合均匀,除去石砾和根系等杂质,经自然风干且分别过 2, 0.5 和 0.149 mm 土壤筛后供试验待用。样地的基本特征见表 1,土壤基本理化性质如表 2 所示。

表 1 样地基本特征

林带名称	林龄/a	株行距/m	树高/m	胸径/cm
低密度	31	3×1.5	15.7	23.2
中密度	31	2×1.5	16.4	21.2
高密度	31	1.5×1.0	15.1	21.3

### 1.3 样品测定

土壤容重的测定采用环刀法;土壤有机碳的测定取过 0.149 mm 土壤筛的风干土样,用碳氮分析仪(Elementar vario EL III)进行测定;全氮的测定采用硫酸高氯酸消煮,用海能 K9860 全自动凯氏定氮仪进行测定;全磷的测定采用硫酸、高氯酸消煮—钼锑抗比色法;pH 值的测定采用电位法,用水处理土壤时液土比为 2.5:1<sup>[2]</sup>。

土壤团聚体包含水稳性团聚体和非水稳性团聚体,土壤团聚体的测定采用筛分法。非水稳性团聚体采用干筛法,将土壤团聚体进行分级。将塑料盒中的土轻轻剥成直径约 10 mm 的小块,挑去树叶、残根、石块等,自然风干 2 d。取 1 000 g 风干土样,分 4 次置于套筛(孔径从上到下依次为 5.0,2.0,1.0,0.5 及

0.25 mm)顶部,人工振动 5 min,然后将留在各级筛子上的样品分别进行称量并且计算所占比例。水稳性团聚体的测定采用湿筛法,湿筛法分为 6 级(>5,5~2,2~1,1~0.5,0.5~0.25,<0.25 mm),根据干筛分取的各级风干土样所占比例配制 50 g,同一样方每层称取 3 个重复,其中小于 0.25 mm 的团聚体虽

然计算数值但并不倒入准备湿筛的样品中。湿筛时,将配好的土壤样品均匀的洒在筛组最上方的套筛上,将筛组放进团粒分析仪的震荡架上,先润湿 3 min,再以 32 mm 振幅,30 次/min 的频率在水中筛分 30 min,之后将各级筛上的团聚体分别洗入铝盒烘干,放置一昼夜后称重。

表 2 黑土区杨树农田防护林不同林带土壤基本理化性质

林分类型	土层深度/ cm	土壤容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	有机碳/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	全氮/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	全磷/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	pH 值
低密度	0—10	1.15	30.32	3.77	0.604	6.78
	10—20	1.16	26.95	3.52	0.574	6.67
	20—40	1.18	25.60	3.30	0.557	7.52
	40—60	1.23	19.06	2.84	0.485	7.61
中密度	0—10	1.21	33.72	4.36	0.582	7.49
	10—20	1.25	20.21	2.67	0.433	6.87
	20—40	1.30	15.76	1.99	0.389	6.77
	40—60	1.30	13.60	1.60	0.318	6.87
高密度	0—10	1.18	36.59	3.63	0.617	7.12
	10—20	1.22	32.57	3.17	0.564	7.37
	20—40	1.22	31.22	2.67	0.558	7.67
	40—60	1.31	30.11	2.64	0.548	7.59
对照	0—10	1.06	26.49	3.44	0.559	6.23
	10—20	1.08	19.47	2.64	0.466	6.29
	20—40	1.11	17.09	2.25	0.448	6.36
	40—60	1.16	12.08	1.66	0.399	6.40

#### 1.4 数据处理

单一的评价指标往往不能如实的反映研究情况,在此采用分形维数(D)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体破坏率(PAD)4种评价指标对土壤团聚体稳定性进行评价,具有更高的灵敏性和准确性<sup>[11]</sup>。

几何平均直径(GMD)和平均质量直径(MWD)是反映土壤团聚体结构和稳定性的重要指标,几何平均直径和平均质量直径值越大,表示土壤结构越好、稳定性越强<sup>[12]</sup>。分形维数(D)越高表示土壤黏粒含量越高、细颗粒越多,沙粒含量越少,土壤质量改善越好,越低则表示土壤结构相对越松散、通透性越好<sup>[13-14]</sup>。团聚体破坏率(PAD)一般其数值越大,表明团聚体越容易遭到破坏,稳定性越低<sup>[15]</sup>。

团聚体平均质量直径<sup>[16]</sup>:

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

团聚体几何平均直径<sup>[17]</sup>:

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n y_i}\right) \quad (2)$$

式中: $x_i$ ——第*i*级团聚体的平均直径(mm); $y_i$ ——第*i*级团聚体占总土壤干质量的百分比。下同。

分形维数(fractal dimension,  $D$ )<sup>[18]</sup>:

$$M(r < x_i) / M_0 = (3 - D) \lg(x_i / x_{\max}) \quad (3)$$

式中: $M(r < x_i)$ ——粒径小于 $x_i$ 的团聚体质量(g); $M_0$ ——土样的总质量(g); $x_{\max}$ ——最大粒级团聚体的平均直径。下同。

团聚体破坏率(PAD)<sup>[19]</sup>

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \quad (4)$$

式中: $DR_{0.25}$ ——大于 0.25 mm 的非水稳性团聚体含量; $WR_{0.25}$ ——大于 0.25 mm 的水稳性团聚体含量。

数据的处理和制图采用 Microsoft Excel 2010,数据的分析采用 SPSS 19.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤团聚体粒径分布及团聚体破坏度

由表 3 可以看出,黑龙江省黑土区杨树农田防护林带土壤非水稳性团聚体主要以>2 mm 的团聚体为主,<0.25 mm 的非水稳性团聚体占比最低,5~2 mm 非水稳性团聚体百分含量最高,最低为 24.75%,最高达 41.16%。>0.25 mm 非水稳性大团聚体占比高达 90%以上,对照各层>5 mm 粒径的

非水稳性团聚体均高于杨树农田防护林带(表3),分别是38.16%,33.19%,41.57%和53.46%。 $<0.25$  mm粒径的非水稳性团聚体百分含量对照占比例最低,各层均低于3.5%。

水稳性团聚体与非水稳性团聚体相比, $>2$  mm粒径的团聚体含量减少,2~1,1~0.5,0.5~0.25, $<0.25$

mm 粒级团聚体含量增加(表4)。不同密度下水稳性团聚体占比最高为32.09%,与非水稳性团聚体相比下降12%。随着林带密度的增大, $>0.25$  mm水稳性团聚体先增加后减小且占比均在70%以上,低密度、中密度、高密度林带 $>0.25$  mm水稳性团聚体含量分别是73.6%,74.2%,72.6%。

表3 黑土区杨树农田防护林土壤不同粒径非水稳性团聚体百分含量

土层深度/cm	样地	不同粒径非水稳性团聚体百分含量/%					
		$>5$ mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	$<0.25$ mm
0—10	对照	38.16±0.46	34.98±0.82	8.72±0.43	11.96±0.26	4.50±0.14	1.67±0.36
	高密度	27.47±4.87	24.75±3.21	9.34±1.19	17.4±3.22	12.26±2.46	8.87±1.74
	中密度	23.04±4.86	32.27±4.73	10.48±1.8	14.16±2.15	12.53±5.42	7.52±0.69
	低密度	22.33±7.72	29.24±2.09	10.9±1.83	18.89±3.91	10.92±2.36	7.72±1.74
10—20	对照	33.19±0.55	30.87±1.12	11.59±1.37	14.27±0.91	6.81±0.44	3.27±0.94
	高密度	13.09±5.97	29.19±4.65	12.38±0.40	21.05±1.66	13.45±3.22	10.84±4.52
	中密度	16.48±4.38	41.16±6.74	10.87±0.41	14.73±2.67	9.54±2.87	7.22±3.07
	低密度	15.63±3.53	36.53±16.11	15.19±6.98	14.83±1.75	9.43±2.76	8.38±4.47
20—40	对照	41.57±1.21	28.49±0.84	8.09±0.62	12.98±0.58	5.46±0.29	3.39±1.00
	高密度	15.52±4.75	35.25±5.68	14.21±1.03	19.32±4.34	10.07±3.22	5.63±2.08
	中密度	29.41±14.77	33.33±11.52	9.3±0.73	11.8±1.71	8.16±2.10	7.99±2.86
	低密度	8.88±2.83	30.5±1.21	11.98±1.24	19.84±1.26	13.32±0.66	15.47±3.71
40—60	对照	53.46±7.06	25.31±3.19	3.94±1.70	8.29±1.79	3.19±0.44	1.80±0.105
	高密度	17.58±4.74	27.84±4.79	15.05±1.99	21.78±1.41	11.95±0.88	5.77±0.93
	中密度	25±11.73	36.14±2.79	9.11±0.68	13.06±2.94	8.47±2.86	8.21±4.11
	低密度	11.24±4.34	29.72±2.43	13.4±1.96	17.94±0.77	12.66±1.06	15.03±3.06

注:数据为平均值±标准差。下同。

表4 不同粒径水稳性团聚体百分含量

土层深度/cm	样地	不同粒径水稳性团聚体百分含量/%					
		$>5$ mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	$<0.25$ mm
0—10	对照	19.50±1.67	17.31±3.57	26.68±2.58	18.87±2.21	7.47±0.40	10.17±1.18
	高密度	20.24±4.05	14.05±0.91	10.80±2.08	14.51±1.20	10.27±0.39	30.09±3.36
	中密度	11.48±1.79	19.32±1.76	17.00±0.78	20.56±0.87	13.07±0.90	18.54±0.79
	低密度	9.17±2.43	16.11±1.91	25.76±2.07	22.65±2.16	9.20±1.25	17.11±0.81
10—20	对照	3.45±1.23	11.39±0.87	14.94±1.11	28.03±2.26	20.47±0.98	21.73±0.44
	高密度	4.70±1.11	12.40±1.96	18.73±6.75	21.44±3.98	11.61±0.72	31.12±8.07
	中密度	2.39±0.64	14.42±0.71	14.67±0.21	22.84±1.18	19.47±1.21	26.21±0.19
	低密度	3.23±0.59	9.59±1.00	11.15±0.79	22.90±0.74	22.27±1.05	30.87±0.74
20—40	对照	1.20±0.97	12.35±0.48	13.62±3.12	28.69±2.82	21.79±1.96	22.35±3.31
	高密度	1.75±1.25	18.50±3.04	30.00±2.95	22.42±0.35	11.61±0.72	17.29±0.58
	中密度	1.75±0.58	11.81±2.04	15.85±1.86	25.97±1.83	18.34±0.75	26.28±2.76
	低密度	1.58±0.16	12.35±0.93	12.69±1.02	26.45±2.05	22.27±1.05	26.75±0.67
40—60	对照	0.79±0.11	7.50±0.62	11.66±2.60	27.54±1.83	22.79±0.85	29.69±3.11
	高密度	0.47±0.39	11.62±1.71	16.98±2.33	24.05±1.73	15.82±0.37	31.06±0.35
	中密度	0.79±0.58	11.93±1.48	13.37±1.19	23.83±1.09	17.98±1.36	32.09±2.78
	低密度	0.68±0.09	10.63±2.12	16.11±1.78	24.09±2.19	17.79±0.55	30.71±2.91

通过水稳性团聚体和非水稳性团聚体的含量变化可以计算团聚体破坏度。由图1可知,随着农田防

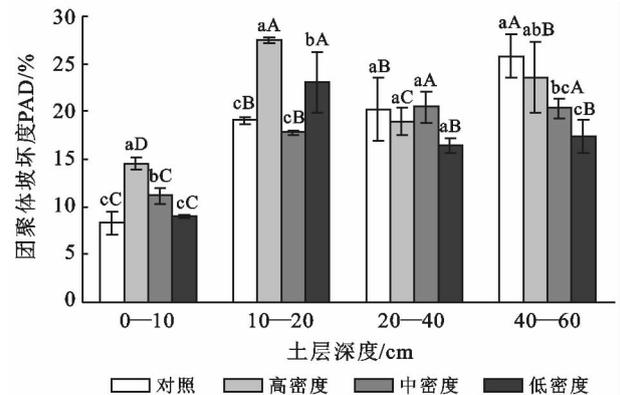
护林林带密度的降低,团聚体破坏率整体呈现下降趋势,土壤团聚体稳定性增强。土壤团聚体破坏度的平

均值从大到小依次是:高密度>对照>中密度>低密度,在 0—10 cm,不同密度防护林带团聚体破坏度差异显著( $p<0.05$ )且均高于对照的团聚体破坏度,对照的团聚体破坏度最低为 8.3%,高密度的团聚体破坏度最高为 14.51%;10—20 cm 土层,不同密度防护林带之间的团聚体破坏度差异显著( $p<0.05$ ),中密度的团聚体破坏度最低为 17.8%,高密度的团聚体破坏度最高为 27.5%;20—40 cm 对照与林带以及林带之间的团聚体破坏度均无显著性差异,低密度的团聚体破坏度最低为 16.4%,中密度的团聚体破坏度最高为 20.5%;40—60 cm 土层,不同密度防护林带之间的团聚体破坏度差异显著( $p<0.05$ ),对照的团聚体破坏度最高为 25.8%,低密度的团聚体破坏度最低为 17.3%。各样地表层土壤团聚体破坏度最低,同一样地不同深度之间差异显著( $p<0.05$ ),随着土层的加深,对照的团聚体破坏度随之增加,而各林带内的团聚体破坏度则随着土层的加深先增加后降低;0—20 cm 的团聚体破坏度高于对照,20—60 cm 各林带内深层土壤的团聚体破坏度逐渐降低至低于对照,40—60 cm 土壤团聚体破坏度从大到小依次为:对照>高密度>中密度>低密度,说明林带降低了深层土壤的团聚体破坏度。

## 2.2 不同密度团聚体稳定性分析

由表 5 可知,干筛下各林带平均质量直径,几何平均直径均小于对照的平均质量直径,几何平均直径值。0—10 cm 的平均质量直径,几何平均直径随林带密度的降低而降低,说明高密度林带表层土壤稳定

性更高。湿筛后相同土层的平均质量直径,几何平均直径值随密度的增大而增大,不同密度林带之间差异显著( $p<0.05$ ),0—10 cm 湿筛平均质量直径,几何平均直径值从大到小依次是:高密度>对照>中密度>低密度,0—20 cm 高密度林带的平均质量直径,几何平均直径值高于对照,中密度、低密度的平均质量直径,几何平均直径值低于对照,20—60 cm 各林带平均质量直径,几何平均直径值均高于对照且与对照差异显著( $p<0.05$ ),即随着林带密度的增加,土壤水稳性团聚体增多,土壤水稳性增强。相同密度下随深度的增加平均质量直径,几何平均直径降低,不同深度之间差异显著( $p<0.05$ ),说明黑龙江省黑土区表层土壤稳定性较高,林带的存在增强了深层土壤的稳定性。



注:同一土层不同密度间差异显著( $p<0.05$ )用不同小写字母表示;同一密度不同深度间差异显著( $p<0.05$ )用不同大写字母表示。下同。

图 1 黑土区杨树农田不同密度防护林团聚体破坏度

表 5 黑土区杨树农田防护林不同密度土壤团聚体的平均质量直径和几何平均直径

土层深度/cm	林分类型	干筛 MWD	湿筛 MWD	干筛 GMD	湿筛 GMD
0—10	对照	4.236±0.096 <sup>aBC</sup>	2.640±0.171 <sup>aA</sup>	3.261±0.105 <sup>aB</sup>	1.930±0.129 <sup>aA</sup>
	高密度	3.076±0.148 <sup>bA</sup>	2.320±0.280 <sup>abA</sup>	2.048±0.084 <sup>bcA</sup>	2.010±0.192 <sup>aA</sup>
	中密度	3.235±0.196 <sup>bA</sup>	1.996±0.080 <sup>bcA</sup>	2.255±0.280 <sup>bb</sup>	1.547±0.037 <sup>bA</sup>
	低密度	2.711±0.019 <sup>cB</sup>	1.840±0.111 <sup>cA</sup>	1.826±0.116 <sup>cB</sup>	1.500±0.060 <sup>bA</sup>
10—20	对照	3.980±0.15 <sup>aC</sup>	1.170±0.107 <sup>bB</sup>	2.731±0.169 <sup>aC</sup>	0.990±0.064 <sup>bcB</sup>
	高密度	2.160±0.218 <sup>cC</sup>	1.440±0.150 <sup>aB</sup>	1.869±0.170 <sup>bA</sup>	1.320±0.089 <sup>aB</sup>
	中密度	2.820±0.219 <sup>bb</sup>	1.140±0.026 <sup>bb</sup>	2.070±0.160 <sup>bcB</sup>	1.040±0.009 <sup>bb</sup>
	低密度	3.076±0.078 <sup>bA</sup>	1.000±0.074 <sup>bB</sup>	2.325±0.049 <sup>cA</sup>	0.925±0.043 <sup>cB</sup>
20—40	对照	4.450±0.17 <sup>aB</sup>	1.020±0.085 <sup>bB</sup>	3.216±0.084 <sup>aB</sup>	0.923±0.037 <sup>bbC</sup>
	高密度	2.530±0.033 <sup>cB</sup>	1.270±0.030 <sup>aB</sup>	1.895±0.190 <sup>cA</sup>	1.250±0.103 <sup>aB</sup>
	中密度	3.197±0.276 <sup>baB</sup>	1.046±0.021 <sup>bc</sup>	2.352±0.061 <sup>bb</sup>	0.990±0.024 <sup>bc</sup>
	低密度	2.240±0.112 <sup>cC</sup>	1.015±0.031 <sup>bB</sup>	1.647±0.087 <sup>dC</sup>	0.950±0.022 <sup>bb</sup>
40—60	对照	5.078±0.382 <sup>aA</sup>	0.879±0.038 <sup>bc</sup>	4.110±0.440 <sup>aA</sup>	0.813±0.018 <sup>bc</sup>
	高密度	2.794±0.175 <sup>cAB</sup>	0.936±0.020 <sup>aC</sup>	1.86±0.121 <sup>cA</sup>	0.999±0.025 <sup>aC</sup>
	中密度	3.539±0.081 <sup>bA</sup>	0.923±0.057 <sup>aD</sup>	2.7±0.013 <sup>ba</sup>	0.963±0.029 <sup>aC</sup>
	低密度	2.545±0.131 <sup>cB</sup>	0.912±0.051 <sup>aB</sup>	1.857±0.05 <sup>cB</sup>	0.956±0.042 <sup>aB</sup>

注:MWD为平均质量直径;GMD为几何平均直径;同一密度不同深度间差异显著( $p<0.05$ )用不同大写字母表示。下同。

由表6可知黑龙江省黑土区不同密度杨树农田防护林非水稳性团聚体分形维数在0—10,10—20 cm随密度的减小而减小,在20—40,40—60 cm随密度的减小而增大。水稳性团聚体分形维数在0—10,10—20,40—60 cm随密度的减小而减小,在20—40 cm随密度的减小而增大。各样地团聚体分形维数

高密度>中密度>低密度>对照,说明林带密度的增大增加了土壤黏粒含量,降低了土壤沙粒含量,土壤质量得到改善。相同土层中对照的分形维数最小,这是因为弃耕地内杂草覆盖率较高,对土壤质量的改善效果较林带差,土壤黏粒含量较低而沙粒含量较高。

表6 黑土区杨树农田防护林不同密度土壤团聚体分形维数(D)

土层深度/cm	林分类型	DD	DR <sup>2</sup>	WD	WDR <sup>2</sup>
0—10	对照	1.721±0.09 <sup>bB</sup>	0.965	2.157±0.09 <sup>cC</sup>	0.993
	高密度	2.251±0.07 <sup>aA</sup>	0.941	2.719±0.07 <sup>aA</sup>	0.974
	中密度	2.193±0.05 <sup>aA</sup>	0.938	2.449±0.08 <sup>bA</sup>	0.981
	低密度	2.172±0.04 <sup>aAB</sup>	0.952	2.397±0.07 <sup>bC</sup>	0.972
10—20	对照	1.914±0.02 <sup>cA</sup>	0.961	2.416±0.04 <sup>bB</sup>	0.926
	高密度	2.236±0.13 <sup>aA</sup>	0.952	2.628±0.11 <sup>aA</sup>	0.978
	中密度	2.12±0.15 <sup>abA</sup>	0.958	2.554±0.04 <sup>abA</sup>	0.958
	低密度	2.14±0.18 <sup>abB</sup>	0.973	2.496±0.13 <sup>abAB</sup>	0.933
20—40	对照	1.907±0.01 <sup>bA</sup>	0.951	2.478±0.03 <sup>abAB</sup>	0.913
	高密度	2.01±0.13 <sup>bB</sup>	0.958	2.441±0.1 <sup>bB</sup>	0.978
	中密度	2.23±0.09 <sup>aA</sup>	0.961	2.553±0.06 <sup>abA</sup>	0.948
	低密度	2.361±0.08 <sup>aA</sup>	0.963	2.611±0.09 <sup>aAB</sup>	0.931
40—60	对照	1.838±0.05 <sup>dA</sup>	0.973	2.53±0.01 <sup>aA</sup>	0.917
	高密度	2.04±0.06 <sup>cB</sup>	0.943	2.608±0.05 <sup>aA</sup>	0.971
	中密度	2.204±0.12 <sup>bA</sup>	0.959	2.589±0.11 <sup>aA</sup>	0.946
	低密度	2.361±0.05 <sup>aA</sup>	0.971	2.565±0.03 <sup>aAB</sup>	0.964

注:DD为非水稳性团聚体分形维数;WD为水稳性团聚体分形维数;DR<sup>2</sup>为非水稳性团聚体在计算D值时的拟合度;WDR<sup>2</sup>为水稳性团聚体的拟合度。

### 3 讨论

农田防护林的存在可以有效改善农业生态环境,减少自然灾害对农业生产造成的危害和损失,改良土壤,防止发生次生盐渍化,维持地力,增强土地的长期生产力<sup>[20]</sup>。农田防护林可以通过改变风速、水汽及温度等来改善小气候,从而有利于林下、田间作物的生长,提高农作物质量和产量。然而以往关于黑龙江省黑土区农田防护林的研究关注点多集中在农田,却很少关注林带自身土壤状况。只有农田防护林自身稳定健康,才能更好地发挥防护效益,而林带土壤与林带相互影响,息息相关。

土壤团聚体对土壤的性质和肥力有着深刻影响<sup>[21]</sup>,各级土壤团聚体的数量和空间分布决定了土壤的持水能力和通透性,并影响土壤微生物的活动以及养分的供应能力<sup>[22]</sup>。有机质的胶结作用可促进土壤大团聚体的形成,降低黏性土壤黏粒的接触面,降低土壤黏性,改善黏土的土壤耕性,增强土壤通透性,降

低土壤容重。本研究显示黑土区杨树农田防护林带土壤有机碳含量从表层到深层由高到低的变化特征,随着杨树防护林带密度的增大表层土壤团聚体破坏度也增大。不同密度杨树农田防护林团聚体分形维数在土壤表层随密度的减小而减小,在土壤深层随密度的减小而增大。这可能是因为农田防护林带行数较少,密度较低的杨树农田防护林带枯落物较难保存,而高密度杨树防护林带则相对容易,因枯落物的增加使得表层土壤有机质含量增高,促进了土壤大团聚体的形成。王贤等<sup>[23]</sup>发现表层土壤的分形维数受枯落物的影响较大,深层土壤的分形维数与根系的穿插和固结作用密切相关。华瑞等<sup>[24]</sup>研究认为土壤分形维数荒草地要低于林地,随着土壤深度的增加,林带的降幅更大。土壤分形维数增大,表明水稳性团聚体及黏粒含量增加,土壤质量改善越明显。这与本文研究结果并不完全一致,可能是因为研究区域不同、土地的利用方式也不同。

一般而言,土壤结构越好、稳定性越强,则几何平

均直径和平均质量直径的值越大,分形维数( $D$ )越高表示土壤黏粒含量越高,沙粒含量越少,土壤的改良程度越高,分形维数越低则表示土壤结构相对越松散、通透性越好。团聚体破坏率(团聚体破坏度)一般数值越大,表明团聚体越容易遭到破坏,稳定性越低。在此用团聚体破坏率、平均质量直径、几何平均直径、分形维数等指标可以更加准确的反映土壤团聚体的稳定性。

本研究中平均质量直径(MWD),几何平均直径(GMD)值随密度的增大而增大,高密度的杨树农田防护林带平均质量直径,几何平均直径值更大,周娅等<sup>[25]</sup>对于北京八达岭不同密度油松的研究发现平均质量直径,几何平均直径随林带密度的增大而降低,这与本文结论不同。本研究中黑土区杨树农田防护林带均为 31 a,平均质量直径,几何平均直径均随黑土区杨树农田防护林带密度的增加而提高,林带团聚体稳定性高于弃耕地。王连晓等<sup>[4]</sup>通过对不同林龄橡胶林土壤团聚体分布特征的研究发现,20 a 的橡胶林平均质量直径,几何平均直径均最大, $D$  值较小,其稳定性最好。杨鹏等<sup>[26]</sup>研究发现不同植被类型下,土壤团聚体稳定性最高的是混交林,其次为纯林,灌草丛最低,这种不同的结论可能是因为不同地区气候条件、土壤类别各不相同<sup>[27-28]</sup>,也可能是因为林带密度的增大,增加了作为胶结物质的有机质含量,有利于团聚体的形成。

本研究选择了不同密度的黑土区杨树农田防护林带为研究对象,可增加不同林龄下各密度的土壤团聚体稳定性变化规律,也可对不同树种的农田防护林带进行研究比较。土壤异质性对土壤分形维数有着深刻影响,土壤有机碳和土壤团聚体稳定性有显著的相关性<sup>[29]</sup>,在这一方面进行研究分析将有助于解释密度对土壤团聚体稳定性的影响。土壤团聚体稳定性与土壤养分含量的相关性也应做进一步的探究,并不仅限于土壤碳、氮、磷的含量,对土壤团聚体的各项评价指标的选取与权重也应做更加细致的研究考量。

## 4 结论

(1) 随着黑土区农田防护林林带密度的降低,土壤团聚体破坏率整体呈下降趋势,从平均值看高密度林带团聚体破坏度要大于弃耕地,低密度林带团聚体破坏度最低。在 40—60 cm 土层范围内,各农田防护林带土壤团聚体破坏度均低于弃耕地,弃耕地团聚体破坏度最大,说明林带的存在降低了深层土壤的团聚体破坏度。

(2) 湿筛平均质量直径(MWD)、几何平均直径

(GMD)均随黑土区农田防护林林带密度的降低而降低,0—20 cm 仅高密度林带平均质量直径、几何平均直径值高于对照。随深度的增加,20—60 cm 平均质量直径、几何平均直径降低但均大于弃耕地,说明林带的存在可以增强深层土壤的稳定性。通过平均质量直径、几何平均直径的变化,可以看出黑龙江省黑土区高密度(1.5 m×1 m)的杨树农田防护林带平均质量直径、几何平均直径更大,水稳性更强。

(3) 非水稳性团聚体分形维数和水稳性团聚体分形维数与土壤容重呈负相关关系,在 0—20 cm 分形维数随密度的减小而减小,在 20—60 cm 随密度的减小而增大。黑龙江省黑土区农田防护林带密度的增大增加了土壤黏粒含量,降低了沙粒含量,土壤团聚体稳定性增强,土壤质量得到改善。高密度(1.5 m×1 m)杨树农田防护林带对土壤的改良效果最明显,深层土壤水稳性最高,但增加了表层土壤团聚体的破坏度。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 邓荣鑫,张树文,李颖. 基于田间尺度的东北农田防护林防护效应分析[J]. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1756-1762.
- [2] 张焜. 土壤水植物理化分析教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011: 45-47.
- [3] Barthes B. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion validation at several levels[J]. *Catena*, 2002, 47(2): 133-149.
- [4] 王连晓,史正涛,刘新有,等. 不同林龄橡胶林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(8): 1381-1388.
- [5] Mandy P, Dominik A, Christina K, et al. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems[J]. *Plant and Soil*, 2009, 324(1/2): 91-102.
- [6] 田慎重,王瑜,李娜,等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7116-7124.
- [7] 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.
- [8] 李景,吴会军,武雪萍,等. 长期不同耕作措施对土壤团聚体特征及微生物多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2341-2348.
- [9] 苏芳莉,赵光辉,王铁良,等. 不同土地利用方式下表层土壤大团聚体特征[J]. 草业科学, 2017, 34(5): 924-931.
- [10] 陈曦,赵雨森,辛颖. 切根贴膜对黑土区杨树农田防护林光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 47-54.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 162-167.
- [14] 周刚, 赵辉, 陈国玉, 等. 花岗岩红壤区不同地类土壤抗蚀性分异规律研究[J]. 中国水土保持, 2008(9): 27-29.
- [15] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰. 不同土地利用方式的土壤团粒及微团粒的分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 47-51.
- [16] 陈山. 不同利用方式土壤团聚体稳定性及其与有机质和铁铝氧化物的关系[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [17] 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.
- [18] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1896.
- [19] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 702-709.
- [20] 刘丽霞, 王辉. 绿洲农田防护林系统水分生态特征研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007.
- [21] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 705-712.
- [22] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 477-455.
- [23] 王贤, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 154-159.
- [24] 华瑞, 徐学选, 张少妮, 等. 不同退耕年限林草地土壤颗粒分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 206-209.
- [25] 周娅, 陈宇轩, 邹瑞, 等. 北京八达岭不同密度油松土壤团聚体特征研究[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(2): 26-30.
- [26] 杨鹏, 李传荣, 孙明高, 等. 沿海破坏山体周边不同植被恢复模式土壤结构特征与健康评价[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 80-84.
- [27] 刘金伟, 李志忠, 武胜利, 等. 新疆艾比湖周边白刺沙堆形态特征空间异质性研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 628-635.
- [28] Wuddivira M N. Structural stability of humid tropical soils as influenced by manure incorporation and incubation duration. [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1-18.
- [29] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22.

(上接第 65 页)

[参 考 文 献]

- [1] 徐文铎. 内蒙古的沙地云杉与云杉林[J]. 植物生态学与地植物学学报 1983, 7(1): 1-7.
- [2] 邹春静, 徐文铎, 刘广田. 沙地云杉种群种子雨的时空分布规律[J]. 生态学杂志, 1978, 17(3): 1-19.
- [3] 黄三祥, 李新彬, 林田苗, 等. 沙地云杉育苗技术及苗木年生长规律研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(6): 11-14.
- [4] 齐淑艳, 王青林, 杨彩民, 等. 云杉杆插繁殖技术研究[M]//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 60-63.
- [5] 徐文铎, 郑元润. 沙地云杉苗期生长与干物质生产关系的研究[J]. 应用生态学报, 1993, 4(1): 1-6.
- [6] 郑元润, 张新时. 徐文铎. 沙地云杉种群调节的研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(4): 312-318.
- [7] 邹春静, 韩士杰. 徐文铎. 沙地云杉构件动态与结构[J]. 武汉植物学研究, 2001, 19(5): 369-376.
- [8] 徐文铎. 内蒙古沙地白扦林的植物组成和生态环境调查[J]. 沈阳农业大学学报, 1987, 18(4): 19-24.
- [9] 刘涛, 张成福, 马国青, 等. 沙地云杉天然结实规律的研究[M]//沙地云杉生态系统研究. 徐文铎, 刘广田. 编. 北京: 中国林业出版社, 1998: 178-182.
- [10] 郑万钧. 中国植物志: 7 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 133-136.
- [11] 郑万钧. 中国树木志[M]. 北京: 中国林业出版社, 1982: 218-220.
- [12] 邹春静, 徐文铎, 齐淑艳. 沙地云杉林的分布与性质[M]//徐文铎, 刘广田. 内蒙古白音敖包自然保护区沙地云杉林生态系统研究. 北京: 中国林业出版社, 1998: 11-16.
- [13] 李春红, 蓝登明, 周世权, 等. 内蒙古白音敖包沙地云杉分类学研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 164-169.
- [14] 朱国庆, 刘世增, 李德禄, 等. 沙地云杉种子萌发及种子育苗实验[J]. 中国农学通报, 2011, 27(16): 22-26.
- [15] 黄三祥. 沙地云杉生态学特性及引种研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
- [16] Bewley J D, Black M. Physiology and Biochemistry of Seeds: Vol. 1[M]. New York: Springer, 1978.