

# 黄泛沙地不同林龄杨树人工林土壤团聚体及有机碳特征

潘嘉琛<sup>1</sup>, 刘超<sup>1</sup>, 董智<sup>1</sup>, 吴其聪<sup>1</sup>, 李红丽<sup>1</sup>, 李耀斌<sup>2</sup>, 张美玲<sup>3</sup>, 杨子晋<sup>1</sup>

(1.山东农业大学 林学院/泰山森林生态系统定位研究站, 山东 泰安 271018;

2.山东省国有东明林场, 山东 东明 274509; 3.山东省东明县林业局, 山东 东明 274500)

**摘要:**为明确黄泛沙地不同林龄杨树人工林对土壤团聚体及有机碳的影响,以山东省国有东明林场 3 a, 5 a, 8 a, 10 a 生杨树人工林土壤为研究对象,采用野外取样、室内试验与湿筛法分析了土壤团聚体组成与稳定性,并分析土壤有机碳含量与储量的变化特征。结果表明:(1) 不同林龄杨树人工林团聚体分布均以大团聚体(>0.25 mm)为主,在表层土层(0—20 cm)中,随林龄的增加,大团聚体含量呈先显著降低后增加再略减的趋势;而在 20—40 cm 土层中,土壤大团聚体含量为 5 a>8 a>3 a>10 a;在 40—60 cm 土层无显著差异;(2) 在 0—20 cm 土层中,有机碳含量表现为 3 a>5 a>10 a>8 a;在 20—60 cm 土层,呈先增后减的趋势,且无显著差异。土壤稳定性与团聚体的形成和有机碳密切相关,有机碳含量与 GMD 值呈极显著正相关关系;(3) 不同林龄杨树人工林有机碳储量均呈现一定程度聚性,在 0—20 cm 各林龄碳储量占总碳储量的 59.17%~74.26%。在 3 a 到 5 a 阶段由于土壤淋溶作用,可能导致有机碳储量发生转移,从表层土层(0—20 cm)向底层土层(20—60 cm)转移,而在 8 a 到 10 a 阶段,有机碳储量从底层土层向表层土层发生转移。研究结果为揭示黄泛沙地杨树人工林土壤团聚结构形成与有机碳提升提供了参考。

**关键词:**杨树人工林; 土壤团聚体; 有机碳; 碳储量; 黄泛沙地

中图分类号:S157.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0025-06

## Distribution Characteristics of Soil Aggregates and Soil Organic Carbon in *Populus* Artificial Forest with Different Forest Ages in Yellow River Flood Plain

PAN Jiachen<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>, DONG Zhi<sup>1</sup>, WU Qicong<sup>1</sup>,  
LI Hongli<sup>1</sup>, LI Yaobin<sup>2</sup>, ZHANG Meiling<sup>3</sup>, YANG Zijin<sup>1</sup>

(1.College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taishan Forest Ecosystem Research Station, Tai'an, Shandong 271018, China; 2.State-Owned Dongming Forest Farm of Shandong Province, Dongming, Shangdong 274509, China; 3.Forestry Bureau of Dongming County, Dongming, Shangdong 274500, China)

**Abstract:** In order to understand different forest age poplar plantation in Yellow River Flood Plain on soil aggregate and organic carbon, 3-year, 5-year, 8-year, 10-year poplar plantations in Dongming state-owned forest farm in Shandong Province were selected as the research objects, field sampling, laboratory test and wet screening method were used to analyze the soil aggregate composition and stability, and analyze the variation characteristics of soil organic carbon content and reserves. The results showed as follows. (1) Soil macroaggregates (> 0.25 mm) were the main aggregates in poplar plantations of different ages. In the topsoil layer (0—20 cm), the content of macroaggregates was firstly significantly decreased, then increased and then slightly decreased with the increase of stand age. However, in the 20—40 cm soil layer, the content of large aggregates was 5-year>8-year>3-year>10-year. There was no significant difference in the 40—60 cm soil layer. (2) In the 0—20 cm soil layer, the organic carbon content was 3-year>5-year>10-year>8-year. In the 20—60 cm soil layer, it showed a trend of increasing first and then decreasing, and there was no significant

收稿日期:2021-05-10

修回日期:2021-05-29

资助项目:山东省农业科技资金(林业科技创新)课题“黄泛沙地防风治沙型优良经济林草高效栽培技术与示范”(2019LY005-03)

第一作者:潘嘉琛(1996—),女,山东济南人,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀及荒漠化治理方面研究。E-mail:panjiachen96@163.com

通信作者:董智(1971—),男,内蒙古乌兰察布市人,教授,博士,主要从事土壤侵蚀及荒漠化治理方面研究。E-mail:nmgdz@163.com

difference. Soil stability is closely related to the formation of aggregates and organic carbon, and the content of organic carbon is positively correlated with GMD value. (3) The organic carbon storage of poplar plantations in different ages showed a certain degree of surface aggregation, and the carbon storage in 0—20 cm layer accounted for 59.17%~74.26% of the total carbon storage. From 3-year to 5-year, soil leaching may lead to the transfer of organic carbon storage from the topsoil layer (0—20 cm) to the bottom soil layer (20—60 cm), while from 8-year to 10-year, the transfer of organic carbon storage from the bottom soil layer to the surface soil layer. The results can provided a reference for revealing the formation of soil aggregate structure and the improvement of organic carbon in poplar plantation in Yellow River Flood Plain.

**Keywords:** plantation; soil aggregates; organic carbon; carbon storage; Yellow River Flood Plain

土壤团聚体是部分土壤颗粒之间黏结力强于其他颗粒,使得多个土壤颗粒黏结在一起所形成的多孔结构体,是土壤结构的基本单元<sup>[1]</sup>。土壤团聚体的数量和分布能够反映土壤通气状况、水分条件和结构性状等<sup>[2-3]</sup>。因此,作为土壤的主要组成成分,土壤团聚体在维持土壤结构,保持土壤养分,提高土壤的生产能力和抗侵蚀能力等方面具有重要作用,是衡量土壤质量的重要指标<sup>[4-5]</sup>。土壤团聚体与有机碳密切相关;一方面,有机碳是团聚体形成的主要胶结物质,被认为是团聚体形成与稳定的主要决定因素<sup>[6]</sup>;另一方面,团聚体对土壤有机碳具有物理保护作用,90%的土壤表层有机碳储存在土壤团聚体中<sup>[7]</sup>。因此,研究土壤团聚体和有机碳的变化特征,对改善土壤质量,提高土壤生产力具有重要意义。

黄泛沙地是黄河历次泛滥、改道、淤积及黄河泥沙被风力搬运沉积在河流沿岸形成的堆积沙地<sup>[8]</sup>,其土壤类型以风沙土、砂质潮土为主,质地粗而松散,结构性差,有机质含量低,易受季节性大风的影响而发生风蚀<sup>[9-10]</sup>。为防治风沙危害,该区域开展了以杨树人工林为主体的防护林网及防沙片林等林业生态建设工程,在区域生态环境的改善、风沙土的改良等方面取得了一定效果。然而,以往主要针对黄泛沙地杨树人工林改善小气候效应、土壤水文效应、经济效益及农林间作增产效应等进行了研究<sup>[11-13]</sup>,而对于土壤能否形成良好团聚结构及其与土壤有机碳间的关系并不明确。特别是随着人工林林龄的增加,土壤团聚体稳定性与有机碳的响应特征尚不清楚。然而,这些问题的定量阐述,对揭示风沙土的团聚体形成与转化规律,提升人工林土壤质量的具有重要意义。因此,本研究以黄泛沙地不同林龄(3 a, 5 a, 8 a, 10 a)杨树人工林土壤为研究对象,采用林龄时间序列模拟杨树生长过程中的时间演替,分析不同林龄杨树人工林土壤团聚体粒级分布与稳定性、土壤有机碳含量及碳储量变化特征,尝试揭示不同林龄人工林对土壤团聚体与有机碳的影响机理,以期改善黄泛沙地土壤质量与提高土壤固碳能力提供一定的理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山东省国有东明林场(115°5′—115°7′E, 35°9′—35°14′N),地处淮河流域黄泛平原风沙区。林场始建于1960年,场部坐落于东明集镇,总面积446 hm<sup>2</sup>,林地面积366.7 hm<sup>2</sup>。研究区地貌属于黄河冲积平原,为黄河多次决口形成的决口扇形地,地势较为平坦,以缓平坡地为主。研究区属于暖温带季风性半湿润气候,多年平均气温15.5℃,年最高气温38.8℃,最低气温-15℃;多年平均降水量为609.3 mm,多集中在6—9月,雨热同季,无霜期215 d。春夏季盛行南风,秋冬季盛行北风,年均风速3 m/s,春季最大风速达15 m/s。土壤成土母质为黄河冲积物,土壤类型为砂质潮土,植被类型属暖温带落叶阔叶林。土壤风蚀与风沙化是林场的主要水土流失问题,为控制区域土地沙化、发展生产和开发利用风沙化土地,东明林场营建了以杨树(*Populus L.*)、国槐(*Sophora japonica*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)等为主体的人工林。

### 1.2 样地设置与样品采集

基于林场为黄泛冲积平原,土壤均为潮土,质地为砂质,各林龄的林分立地相一致,管理条件一致,杨树人工林每10 a进行一次轮伐的实际,本文采用时空替代法,于2020年7月选取同一林班相邻小班3 a, 5 a, 8 a, 10 a林龄的杨树林地代替同一生长地点上不同林龄的杨树林地(表1)。不同年限杨树人工林均为第2代杨树纯林,造林前整地,造林密度为3 m×6 m,种植3 a后每年抚育1次,后期轻度间伐,采取轮伐的方式,10 a后杨树人工林便采伐重新栽植杨树幼苗。林下植被稀疏,主要有白茅(*Imperata cylindrica (L.) Beauv.*)、狗尾草(*Setaria viridis (L.) Beauv.*)、地锦(*Euphorbia humifusa Willd.*)、苍耳(*Xanthium strumarium L.*)、藜(*Chenopodium album L.*)、反枝苋(*Amaranthus retroflexus L.*)、稗草(*Echinochloa*

*crusgalli* (L.) Beauv), 盖度不足 5%。各林分管理措施一致, 每年均进行一次修枝抚育, 灌溉 1 次。

在每个林龄的地块内设置 3 个 20 m×20 m (长×宽) 的标准样地, 每个样地选取 3 个典型样点作为重复, 每个样点共采集土样 9 个。去除表层枯落物后挖掘土壤剖面, 按 0—20, 20—40, 40—60 cm 分层采集原状土样约 1 kg 于硬质塑料盒中, 带回实验室

表 1 供试样地的基本信息

林龄/ a	海拔/ m	平均 胸径/cm	平均 树高/m	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/ %	黏粒 <0.002 mm/%	粉粒 0.002~0.02 mm/%	砂粒 0.02~2 mm/%	有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )
3	66	13.6	13.3	1.52	39.20	1.67	23.03	75.30	3.90
5	67	16.2	15.4	1.58	41.71	0.33	9.65	90.02	3.05
8	61	21.8	22.6	1.51	38.78	1.39	21.18	77.43	2.20
10	63	22.4	26.3	1.44	42.32	1.90	31.21	66.89	2.40

### 1.3 测定项目与方法

土壤理化指标参照《土壤农业化学分析方法》进行测定: 土壤容重采用环刀法, 土壤有机碳 (TOC) 采用重铬酸钾外加热—硫酸亚铁滴定法<sup>[14]</sup>。

土壤团聚体分级采用改进后的 Elliot 湿筛法<sup>[15]</sup>: 土壤样品过 8 mm 筛后, 称取 50 g 放置于水稳性团聚体分析仪的套筛中, 套筛自上而下依次为 2 mm, 0.25 mm 和 0.053 mm。将套筛缓慢放于湿筛仪桶内, 水面保持低于最上方筛边缘, 浸泡 5 min 之后上下振荡 2 min (振幅 3 cm, 频率 30 次/min), 振荡时要保证最上层的筛子浸没在水中。筛分完成后, 收集各粒径筛内土样, 于 50℃ 下烘干并称重, 计算各级团聚体的质量百分比。

团聚体几何平均直径 (geometric mean diameter, GMD) 计算公式为:

$$\text{GMD} = \exp \left[ \frac{\sum (W_i \ln X_i)}{\sum W_i} \right] \quad (1)$$

式中:  $n$  为粒径分组的组数;  $X_i$  为该粒径团聚体平均直径 (mm);  $W_i$  为该粒径团聚体质量占土壤质量的百分数 (%)

土壤碳储量的计算公式为:

$$\text{SOC}_s = \sum 0.1 E_i D_i C_i \quad (2)$$

式中:  $\text{SOC}_s$  为土壤层碳储量 (t/hm<sup>2</sup>);  $E_i$  为第  $i$  层土壤容重 (g/cm<sup>3</sup>);  $D_i$  为第  $i$  层土层厚度 (cm);  $C_i$  为第  $i$  层土壤有机碳含量 (g/kg)。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2019, SPSS 26.0 软件进行统计分析, 采用单因素方差分析 (One-way-ANOVA) 检验不同林龄杨树人工林理化性质、团聚体粒径分布及稳定性的差异显著性, 显著水平为 0.05, 运用 Origin 2021 进行作图。

后, 用手轻轻沿其自然缝隙剥成直径约 1 cm 的小块后, 去除石块和植物残体, 置于阴凉通风处风干, 供土壤团聚体测定使用。同时, 分层采集土壤样品 1 kg 左右, 带回室内, 经去除石块根系、风干、磨碎、过筛处理后, 进行土壤有机碳测定; 此外, 在剖面上分层采集环刀、铝盒样品测定土壤容重、孔隙度、含水量等物理指标, 所有采样均重复 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林龄杨树人工林土壤团聚体粒径分布特征

不同林龄杨树人工林土壤团聚体分布见表 2。粒径 > 2 mm 的团聚体在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中, 均随林龄的增加呈先减少后增加的趋势; 而粒径 2~0.25 mm 的团聚体规律与之相反, 呈现先增后减的规律; 粒径 0.25~0.053 mm 的团聚体含量在 0—20 cm 的土层中均呈现先增后减的趋势, 在 20—40 cm 的土层中团聚体含量先减少后增加; 粒径 < 0.053 mm 的团聚体含量呈现均匀化态势, 处理间差异不显著。在土层深度变化上, 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中团聚体组成随林龄的变化趋势一致, 3 a, 5 a 与 8 a 生杨树林粒径 > 2 mm 的团聚体含量在两个层次上分别为 58.32%, 6.45%, 5.27% 和 38.48%, 4.60%, 4.43%, 即随土层深度的增加, > 2 mm 团聚体含量逐渐降低; 在 40—60 cm 土层中, 林龄对土壤团聚体组成无显著差异。

由表 2 可知, 不同林龄杨树人工林土壤团聚体均以大团聚体 (> 0.25 mm) 为主, 占整个团聚体含量 57.98%~92.84%, 最大值 (92.84%) 出现在 0—20 cm 土层的 3 a 杨树人工林, 最小值 (57.98%) 出现在 10 a 的 20—40 cm 土层。不同林龄同一土层中, 大团聚体含量随林龄的增加变化不同。在 0—20 cm 土层中, 随杨树人工林林龄增加, > 0.25 mm 大团聚体含量总体呈 3 a 至 5 a 时期降低, 5 a 至 8 a 时期增加, 8 a 至 10 a 略有降低的趋势; 在 20—40 cm 土层, 大团聚体含量随林龄增长呈先增后减的趋势, 5 a 杨树人工林含量高达 91.07%, 比 10 a 杨树人工林显著增高 33.09%; 在 40—60 cm 土层中, 杨树人工林各林龄间土壤大团聚体含量无显著差异。

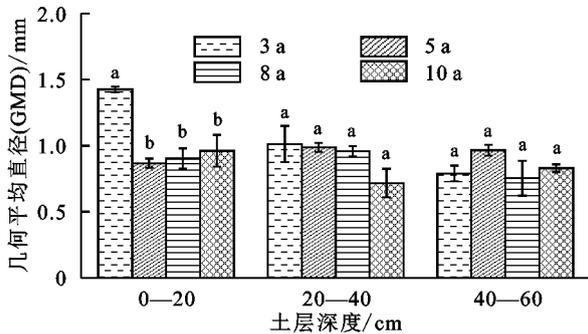
表 2 不同林龄杨树人工林土壤团聚体组成

土层深度/cm	林龄/a	团聚体组成/%				
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm	>0.25 mm
0—20	3	58.32±2.26Aa	34.52±2.25Bc	5.50±0.38Bb	1.66±0.23Aa	92.84±0.14Aa
	5	6.45±0.83Ab	69.93±4.52Bab	19.35±4.83Aa	4.26±0.77Aa	76.38±4.59Bb
	8	5.27±3.24Ab	76.21±2.33Aa	14.16±4.22Aab	4.36±2.35Aa	81.48±5.56Aab
	10	18.70±8.01Ab	60.93±4.98Ab	13.57±2.83Aab	6.81±3.95Aa	79.63±6.75Aab
20—40	3	38.48±10.44Aa	32.31±4.09Bc	22.13±3.51Aab	7.08±2.97Aa	70.79±6.43Bbc
	5	4.60±3.83Ab	86.47±1.83Aa	6.50±0.67Bb	2.44±1.17Aa	91.07±1.82Aa
	8	4.34±1.44Ab	83.16±5.60Aa	10.43±4.02Ab	2.07±0.75Aa	87.50±4.74Aab
	10	8.30±5.78Bb	49.70±1.69Ab	29.72±8.35Aa	12.29±8.70Aa	57.98±7.44Ac
40—60	3	6.68±0.61Ba	58.33±7.77Aa	30.91±6.96Aa	4.09±0.76Aa	65.01±7.70Ba
	5	8.70±5.29Aa	76.37±1.98ABa	12.95±3.79ABa	1.99±0.52Aa	85.07±3.30ABa
	8	4.37±0.87Aa	57.13±17.11Aa	31.20±13.32Aa	7.30±3.77Aa	61.51±16.50Aa
	10	7.66±3.68Ba	62.05±8.43Aa	27.01±5.10Aa	3.28±0.25Aa	69.71±5.30Aa

注:数据为平均值±标准误;不同小写字母表示相同土层不同林龄土壤团聚体间差异显著( $p<0.05$ );不同大写字母表示相同林龄不同土层土壤团聚体间差异显著( $p<0.05$ ),下同。

## 2.2 不同林龄杨树人工林土壤团聚体稳定性特征

GMD可表征土壤团聚体稳定性。由图1可知,在0—20 cm土层,3 a杨树人工林团聚体的GMD显著高于5 a,8 a和10 a杨树人工林,10 a杨树人工林相比于5 a与8 a杨树林团聚体GMD略有增加( $p>0.05$ ),即团聚体稳定性在不同林龄中表现为3 a>10 a>8 a>5 a。在20—40 cm土层,GMD在3 a处达到最高,为1.01 mm,在10 a处达到最低,为0.72 mm,且随林龄的增加呈下降的趋势,但各林龄之间差异不显著,即团聚体稳定性随林龄的增加而逐渐降低。在40—60 cm土层,各林龄杨树人工林团聚体GMD随林龄的增加呈先增后减再增的趋势,最高点为5 a,为0.96 mm,最低点为8 a,为0.75 mm,但各林龄无显著差异。



注:不同小写字母表示相同土层不同林龄团聚体间GMD差异显著( $p<0.05$ )。

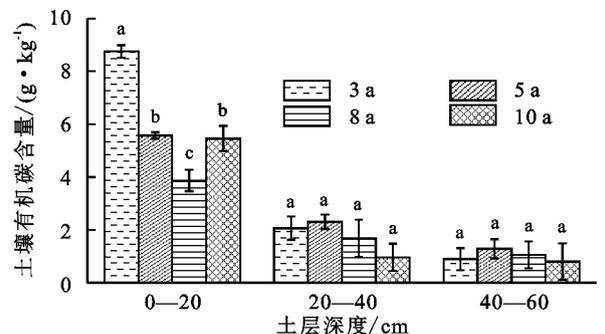
图 1 不同林龄杨树人工林土壤团聚体 GMD

## 2.3 不同林龄杨树人工林土壤有机碳及其储量分布特征

不同林龄0—60 cm土壤有机碳垂直变化趋势表现为:土壤有机碳含量随土层深度增加呈下降趋势,不同林龄40—60 cm较0—20 cm土层有机碳含量随

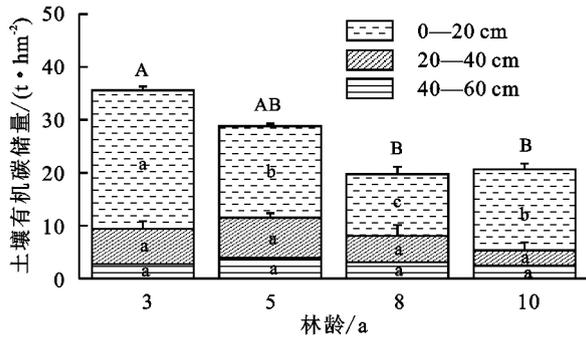
林龄增加依次下降 67.18%, 46.48%, 42.73% 和 64.49%(图2)。在0—20 cm土层有机碳含量随林龄的增加呈先降低后升高的趋势,3 a杨树人工林有机碳含量为8.75 g/kg,与5 a,8 a,10 a杨树林相比显著提高 13.43%, 20.64%, 13.96%;在20—40 cm与40—60 cm土层中,有机碳含量随林龄的增加呈先上升后下降的趋势,各林龄无显著差异。

由图3可知,不同林龄杨树人工林在0—60 cm土层的总有机碳储量变化较大,3 a杨树人工林有机碳储量为35.60 t/hm<sup>2</sup>,5 a,8 a和10 a杨树人工林有机碳储量较3 a杨树人工林降低了6.48%~15.11%。土壤有机碳储量主要集中在表层(0—20 cm),不同林龄相同土层有机碳储量在0—20 cm表现为3 a显著高于其他林龄,8 a最低,为11.69 t/hm<sup>2</sup>( $p<0.05$ ),即3 a>5 a>10 a>8 a。在20—40 cm土层,有机碳储量随林龄的增加呈先增后减的趋势,5 a最高为7.60 t/hm<sup>2</sup>,10 a最低,较5 a降低了12.35%,各林龄之间无显著差异。在40—60 cm土层,不同林龄相同土层有机碳储量表现为5 a>8 a>3 a>10 a。



注:不同小写字母表示相同土层不同林龄土壤有机碳含量差异显著( $p<0.05$ )。

图 2 不同林龄杨树人工林土壤有机碳含量



注:不同小写字母表示相同土层不同林龄土壤有机碳储量差异显著( $p < 0.05$ );不同大写字母表示 0—60 cm 土层不同林龄土壤有机碳储量差异显著( $p < 0.05$ )。

图 3 不同林龄杨树人工林土壤有机碳储量

## 3 讨论

### 3.1 林龄对杨树人工林土壤团聚体稳定性的影响

土壤大团聚体( $>0.25$  mm)是土壤团粒结构的重要组成部分,其含量越高,表征土壤结构稳定性越好<sup>[16]</sup>。土壤团聚体的几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体数量分布状况的综合指标,也可以表征土壤团聚体的稳定性<sup>[17]</sup>。本研究发现,不同林龄杨树人工林土壤团聚体均以大团聚体为主,在表层(0—20 cm)土层中,土壤大团聚体含量在 3 a 阶段达到最高,并且随林龄的增加呈先减后增的趋势;表层土壤团聚体 GMD 随林龄的增加也呈现先减后增的趋势。冯文瀚等<sup>[18]</sup>在鹅掌楸人工林开展的研究中也发现类似的结果:土壤大团聚体含量总体表现为幼龄林至中龄林时期减少,在中龄林至成熟林时期增加的趋势。这可能与轮伐后的土壤遗留物有关。在本研究中杨树人工林的轮伐期为 10 a,10 a 杨树采伐后重新栽种新生杨树幼苗,土壤中有有机质的遗留与原有的腐殖质层促进土壤中微团聚体快速胶结形成大团聚体<sup>[19]</sup>,导致在 3 a 阶段时土壤大团聚体含量达到最高。而在 5 a 阶段,土壤大团聚体含量和 GMD 处于最低点,可能原因是种植 3 a 后杨树幼苗抚育导致表层土壤中的根系遭到破坏,使其数量、长度与密度降低,从而影响养分、水分的运输以及根土的黏结能力,进而使土壤团聚体稳定性降低。相反,在 20—40 cm 土层中,土壤大团聚体含量呈先增后减的趋势,在 5 a 阶段达到最高。可能原因是,3 a 杨树人工林根系生长主要分布在表层土壤中,随杨树生长年限的增加,根系不断向土壤深层延伸,根系之间的物理缠绕作用、根系分泌物以及根系可以间接地对土壤微生物产生影响使土壤颗粒黏结在一起形成大团聚体等途径来提高土壤团聚体的数量和稳定性<sup>[20]</sup>。20—40 cm 土层 GMD 随林龄的增加变化并不明显,可能的原因是

土壤大团聚体包括土壤粒径 $>2$  mm 与 2~0.25 mm 的团聚体,而 GMD 是通过平均 $>2$  mm,2~0.25 mm,0.25 mm~0.053 mm 和 $<0.053$  mm 4 个粒级来反映土壤结构稳定性,且土壤粒径 $>0.25$  mm 的团聚体含量占主体,因此 GMD 在计算后比大团聚体含量更平均化,在林龄的影响下变化并不显著。

### 3.2 林龄对杨树人工林有机碳的影响

通过研究发现,黄泛沙地杨树人工林土壤有机碳在表层随林龄的增加呈先骤减后缓慢增加的趋势。可能原因是:(1)东明林场的造林采用轮伐方式,在杨树人工林达到 10 a 采伐期之后,随即砍伐并栽种新生杨树幼苗,由此造成上一代采伐剩余物较多,并在表层土壤中发生了自然积累过程。杨树作为早期速生树种,有机碳在初期的消耗少于上一代采伐林木剩余物有机碳的积累,且 3 a 至 5 a 处于生长阶段杨树人工林大量吸收有机质矿化产生的养分,导致土壤有机碳含量下降<sup>[21]</sup>。而在 8 a 后随着杨树生长发育完全,有机碳的消耗处于稳定阶段,而凋落物量、郁闭度增大以及前期抚育可能会在土壤中遗留部分死根,使有机碳输入量增加,因此在 8 a 至 10 a 阶段土壤有机碳缓慢增加。(2)本研究中,杨树人工林土壤表层有机碳含量与土壤 GMD 呈极显著正相关关系(表 3),这表明土壤有机碳含量随林龄的变化可能是由于团聚体稳定性的改变而引起的。前人研究中也类似的结果:大团聚体内有机碳含量更高,这是由于微团聚体在多糖和植物根系分泌物等不同胶结剂的作用下形成大量临时性大团聚体所致<sup>[22]</sup>。然而,本研究中土壤团聚体稳定性在 5 a 阶段最低,而土壤有机碳含量在 8 a 阶段最低,这其中可能原因是林场的抚育措施导致杨树根系遭到破坏,进而导致团聚体稳定性受到影响以及土壤团聚体的形成与有机碳的胶结存在滞后的时间差异。

表 3 0—20 cm 土层有机碳组分及土壤团聚体物理性质相关性

指标	SOC	$R_{0.25}$	GMD	$SOC_s$
SOC	1.000			
$R_{0.25}$	0.589 *	1.000		
GMD	0.841 **	0.880 **	1.000	
$SOC_s$	0.986 **	0.554	0.817 **	1.000

注: \*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著, \* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

### 3.3 林龄对杨树人工林碳储量的影响

本研究结果表明,不同林龄杨树人工林土壤有机碳储量随土层深度增加逐渐减少,碳储量在 0—60 cm 土层中表现出明显的层次性。0—20 cm 土层各林龄的碳储量占总碳储量的 59.17%~74.26%,呈现出一定程度的表聚性,且随林龄的增加碳储量呈现先

下降后上升的趋势,在20—40 cm与40—60 cm土层无明显差异。这种表聚性现象的产生可能是因为上一代轮伐后的剩余物归还土壤与地上凋落物掉落到地面,通过分解并入表土,因此表土比底土接收到更多的碳输入<sup>[23-24]</sup>。不同林龄杨树人工林在0—60 cm土层土壤有机碳储量随林龄的增加呈先降低后略增的趋势。在3 a至5 a阶段,0—20 cm土层碳储量显著降低,而总有机碳储量略有降低,20—40 cm土层碳储量略有增加且无显著差异,这可能是表层有机碳向底层发生转移。已有研究表明,水分是限制有机物归还量的重要影响因素<sup>[25]</sup>,由于3 a林冠的开放性与林分郁闭度较低,林分节流少,更多的雨水进入到林间空地,导致土壤的淋溶作用,土壤养分减少,土壤有机碳储量由表层向深层转移<sup>[26]</sup>。在5 a至8 a阶段,总有机碳储量与各土层碳储量都减少,可能因为与之前有机碳含量分析原因相同,随着杨树生长发育,此阶段杨树人工林大量吸收有机质矿化产生的养分,导致土壤有机碳储量降低。在8 a至10 a阶段,总有机碳储量略有增加( $p > 0.05$ ),而表层碳储量与8 a相比显著增加。一方面,杨树人工林林冠展开,郁闭度增加,凋落物在表层分解转化以有机碳的形式进入土壤使0—20 cm土层碳储量增加<sup>[27]</sup>;另一方面,林冠的展开会拦截雨水的下落,阻碍水分的下渗,土壤淋溶减少,使20—40 cm土层碳储量减少。

## 4 结论

(1) 不同林龄杨树人工林团聚体分布均以大团聚体( $> 0.25$  mm)为主,在表层土层(0—20 cm)中,随林龄的增加,大团聚体含量呈现先显著降低后增加再略减的趋势;而在20—40 cm土层中,土壤大团聚体含量为5 a $>$ 8 a $>$ 3 a $>$ 10 a;在40—60 cm土层无明显差异。

(2) 在0—20 cm土层中,有机碳含量表现为3 a $>$ 5 a $>$ 10 a $>$ 8 a;在20—60 cm土层,呈先增后减的趋势,且无显著差异。土壤稳定性与团聚体的形成和有机碳密切相关,有机碳含量与GMD值呈极显著正相关关系。

(3) 不同林龄杨树人工林有机碳储量均呈现一定程度表聚性,在0—20 cm各林龄碳储量占总有机碳储量的59.17%~74.26%。在3 a到5 a阶段由于土壤淋溶作用,可能导致有机碳储量发生转移,从表层土层(0—20 cm)向底层土层(20—60 cm)转移,而在8 a到10 a阶段,有机碳储量从底层土层向表层土层发生转移。

## 参考文献:

- [1] Lehmann A, Zheng W, Ryo M, et al. Fungal traits important for soil aggregation[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 10: 2904, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02904>.
- [2] 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(1):129-135.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 韩新生,马璠,郭永忠,等.土地利用方式对表层土壤水稳性团聚体的影响[J].*干旱区资源与环境*,2018,32(2):114-120.
- [6] 吴其聪,张丛志,张佳宝,等.不同施肥及秸秆还田对潮土有机质及其组分的影响[J].*土壤*,2015,47(6):1034-1039.
- [7] 刘思佳,关松,张晋京,等.秸秆还田对黑土团聚体有机碳含量的影响:基于多级团聚体结构的物理和化学保护作用[J].*吉林农业大学学报*,2019,41(1):61-70.
- [8] 李红丽,董智,张昊,等.黄泛平原发展牧草产业治理风沙化土地的探讨[J].*中国草地学报*,2006,28(5):104-109.
- [9] 董智,李红丽,任国勇,等.黄泛平原风沙化土地种植牧草改良土壤效果研究[J].*中国草地学报*,2008,30(3):84-87.
- [10] 任中兴,房用,杨吉华,等.黄泛沙地小网格农田防护林网防风固沙和增产效益的研究[J].*山东农业大学学报:自然科学版*,2009,40(3):398-404.
- [11] 姬生勋,刘玉涛,董智,等.黄泛平原风沙区不同造林年限林地土壤风蚀与理化性质的变化[J].*水土保持研究*,2011,18(3):158-161,167.
- [12] 邴贝贝,李传荣,许景伟,等.黄泛平原小网格农田林网的风场特征[J].*中国水土保持科学*,2013,11(4):42-48.
- [13] 陈慧碧.黄泛平原地区杨树复合经营模式调查及典型林农经营效益的研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,1999:14-114.
- [15] Elliott E T, Cambardella C A. Physical separation of soil organic matter [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1991,34(1/4):407-419.
- [16] 白秀梅,韩有志,郭汉清.庞汉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征[J].*生态学报*,2014,34(7):1654-1662.
- [17] 卢金伟,李占斌.土壤团聚体研究进展[J].*水土保持研究*,2002,9(1):81-85.

- [19] 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.
- [20] Chen H Q, Hou R X, Gong Y S, et al. Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China [J]. Soil and Tillage Research, 2009,106(1):85-94.
- [21] Hou X Q, Li R, Jia Z K, et al. Effect of rotational tillage on soil aggregates, organic carbon and nitrogen in the Loess Plateau area of China[J]. Pedosphere, 2013, 23(4):542-548.
- [22] 冯欢,张俊岭,张风华.不同复垦模式对土壤团聚体及水溶性阳离子的影响[J].水土保持研究,2018,25(6):94-99,108.
- [23] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等.不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2010,30(4):1035-1041.
- [24] 王兴,钟泽坤,张欣怡,等.长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系[J].环境科学,2020,41(5):2416-2424.
- [25] 张钦,于恩江,林海波,等.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[J].水土保持研究,2019,26(2):9-16.
- [26] Al-Kaisi M M, Yin X H. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations [J]. Journal of Environmental Quality, 2005,34(2):437-445.
- [27] 张旭辉,李恋卿,潘根兴.不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J].生态学杂志,2001,20(2):16-19.
- [28] Chan K Y, Heenan D P. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage[J]. Soil and Tillage Research, 1996, 37(2):113-125.
- [29] Martens D A. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000,32(3):361-369.
- [30] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils:a review on the influence of land use and management practices [J]. Geoderma, 2003, 113(3):357-380.
- [31] 魏艳春,马天娥,魏孝荣,等.黄土高原旱地不同种植系统对土壤水稳性团聚体及碳氮分布的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(2):305-313.
- [32] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain[J]. Catena, 2017,156:176-183.
- [33] 赵彩衣,王媛媛,董青君,等.不同水肥处理对苕子和后茬玉米生长及土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):161-166,269.
- [34] 朱青,崔宏浩,张钦,等.绿肥阻控贵州山区坡耕地水土流失的应用[J].水土保持研究,2016,23(2):101-105.

(上接第30页)

- [18] 冯文瀚,李金彪,周聪,等.不同林龄鹅掌楸人工林土壤团聚体及其有机碳状况[J].中南林业科技大学学报,2021,41(2):133-141.
- [19] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等.峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J].应用生态学报,2014,025(3):671-678.
- [20] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].水土保持学报,2020,34(3):267-273,298.
- [21] 王心怡,周聪,冯文瀚,等.不同林龄杉木人工林土壤团聚体及其有机碳变化特征[J].水土保持学报,2019,33(5):126-131.
- [22] 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.
- [23] 赵俊峰,肖礼,黄懿梅,等.黄土丘陵区不同种植类型梯田2 m 土层有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2017,31(5):253-259.
- [24] Zhang Y, Tigabu M, Yi Z, et al. Soil parent material and stand development stage effects on labile soil C and N pools in Chinese fir plantations [J]. Geoderma, 2019,338:247-258.
- [25] 邹俊亮,郭胜利,李泽,等.小流域土壤有机碳的分布和积累及土壤水分的影响[J].自然资源学报,2012,27(3):430-439.
- [26] 赵俊峰,肖礼,黄懿梅,等.黄土丘陵区不同种植类型梯田2 m 土层有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2017,31(5):253-259.
- [27] 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.