DOI: 10.20103/j.stxb.202306231335

白晓雄,李妍,胡斯乐,董立国,张敏,王迎,余旋.林龄对刺槐人工林土壤团聚体、有机碳和细菌群落的影响.生态学报,2024,44(12):5259-5268. Bai X X, Li Y, Hu S L, Dong L G, Zhang M, Wang Y, Yu X.Impacts of stand ages on soil aggregate, organic carbon, and bacterial communities in *Robinia pseudoacacia* plantation.Acta Ecologica Sinica,2024,44(12):5259-5268.

林龄对刺槐人工林土壤团聚体、有机碳和细菌群落的影响

白晓雄1,李 妍1,胡斯乐1,董立国1,4,张 敏1,王 迎1,余 旋1,2,3,*

1 西北农林科技大学林学院,杨凌 712100

2 陕西省林业综合重点实验室,杨凌 712100

3 国家林业局黄土高原林木培育重点实验室,杨凌 712100

4 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所,银川 750002

摘要:探究刺槐人工林土壤团聚体、有机碳及细菌群落的变化特征,可为提升土壤质量与功能提供理论依据。以黄土高原沟壑 区不同林龄刺槐人工林(8年生、18年生和30年生)和刚撂荒的农耕地(CK)为研究对象,利用最适湿度筛分法获得不同粒径团 聚体,测定其有机碳含量和细菌群落结构特征。结果表明:(1)各林龄土壤团聚体均以>0.25 mm 粒径为主,含量为92.74%— 95.78%。土壤团聚体稳定性随着林龄的增加显著提高,以30年生林地最高,团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径 (GMD)分别较 CK显著增加48.19%和91.38%(P<0.05)。(2)各林龄均以<0.25 mm 粒径有机碳含量最高。土壤有机碳含量和 >2 mm 粒径团聚体有机碳含量均随着林龄的增长而显著增加。(3)团聚体细菌群落主要由变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门 (Actinobacteria)和酸杆菌门(Acidobacteria)组成。随着林龄的增加,各粒径团聚体中放线菌门相对丰度先降低后增加,18年生 林地最低。酸杆菌门变化趋势与放线菌门相反。变形菌门无明显变化。土壤有机碳、pH、全氮和全磷是影响团聚体细菌群落 的主要因素。(4)>2 mm 和2—0.25 mm 粒径团聚体中,已科河菌门(Rokubacteria)对团聚体稳定性影响最大,既对团聚体稳定 性产生直接正效应,又通过增加有机碳的含量间接提高团聚体稳定性。在<0.25 mm 粒径团聚体中,有机碳含量对其稳定性的 影响最大,有机碳含量越高,团聚体稳定性越强。综上,营造刺槐人工林有利于提高土壤团聚体稳定性,促进土壤有机碳的积 累,可作为该区域生态恢复的有效措施。在生长发育过程中,人工林可通过改变土壤团聚体细菌群落和有机碳含量从而影响团 聚体的稳定性。

关键词:刺槐;团聚体分布;团聚体稳定性;细菌群落;团聚体有机碳

Impacts of stand ages on soil aggregate, organic carbon, and bacterial communities in *Robinia pseudoacacia* plantation

BAI Xiaoxiong¹, LI Yan¹, HU Sile¹, DONG Liguo^{1,4}, ZHANG Min¹, WANG Ying¹, YU Xuan^{1,2,3,*}

1 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling 712100, China

2 Key Comprehensive Laboratory of Forestry, Shaanxi Province, Yangling 712100, China

3 Key Laboratory of Silviculture on the Loess Plateau State Forestry Administration, Yangling 712100, China

4 Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Agriculture and Forestry Science Academy, Yinchuan 750002, China

Abstract: Exploring the change characteristics of soil aggregate, organic carbon, and bacterial communities in *Robinia pseudoacacia* plantation could provide a theoretical basis for soil quality and function improvement. *Robinia pseudoacacia* plantations with different ages (eight, eighteen, and thirty years old) and abandoned farmland (CK) in gully region of the

收稿日期:2023-06-23; 网络出版日期:2024-04-09

基金项目:"十三五"国家重点研发计划项目(2016YFC0501706-1)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yux@ nwsuaf.edu.cn

Loess Plateau were selected as the study sites. Soil aggregates with different particle sizes were obtained through the optimal moisture sieving method and then detected aggregate associated organic carbon contents and bacterial communities. The results showed that: (1) regardless of the Robinia pseudoacacia plantation age, the soil aggregates were primarily macroaggregates (>0.25 mm). The proportions of macroaggregates were 92.74%-95.78% in the Robinia pseudoacacia plantations with different ages. The stability of the soil aggregates increased with plantation ages and the maximum was observed in the 30-year Robinia pseudoacacia plantations. Compared to CK, the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) in the 30-year Robinia pseudoacacia plantations significantly increased by 48.19% and 91. 38%, respectively (P < 0.05). (2) In the plantations of different ages, soil organic carbon contents were concentrated in the < 0.25 mm fractions. Both of the organic carbon content in soil and > 2 mm fractions significantly increased with plantation age. (3) The bacterial communities in different particle size aggregates were mainly composed of Proteobacteria, Actinobacteria, and Acidobacteria. During Robinia pseudoacacia growth, the relative abundances of Actinobacteria firstly elevated and afterwards reduced and the minimum was observed in the 18-year Robinia pseudoacacia plantations. The change trends of Acidobacteria were contrary to Actinobacteria. There was no obvious change of Proteobacteria. Soil organic carbon. pH, total nitrogen and phosphorus were the main factors affecting bacterial communities of aggregates. (4) In the >2 mm and 2-0.25 mm fractions, the relative abundance of Rokubacteria had the greatest impact on aggregate stability, which exerted both direct and indirect effects on aggregate stability by increasing organic carbon contents. In the < 0.25 mm fractions, the organic carbon contents had the greatest impact on aggregate stability. The higher the organic carbon content, the stronger the stability of the aggregate. In conclusion, Robinia pseudoacacia plantation not only improves the stabilization of soil aggregates, but also promotes the accumulation of organic carbon, which may be used as an effective measure to restore ecology in this region. During the growing process, the plantation impacts soil aggregate stability by altering the aggregate associated bacterial community and organic carbon contents.

Key Words: : Robinia pseudoacacia; aggregate distribution; aggregate stability; bacteria community; aggregate-associated organic carbon

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,对于提升土壤质量与功能具有重要意义^[1]。土壤有机碳是影响团 聚体形成和稳定的主要因素^[2]。土壤团聚体是土壤有机碳的储存场所,近 90%的土壤有机碳储存在团聚体 中^[3]。土壤微生物通过释放代谢产物和酶类物质,影响土壤有机质的分解和转化,进而影响土壤团聚体的形 成和稳定^[4]。细菌是土壤中丰度最高、多样性最丰富的微生物类群,不仅是土壤碳循环的主要调控者^[5],而 且对土壤团聚体的形成及稳定具有重要作用^[6]。天然次生林演替、人工林发育、造林模式等均会导致土壤团 聚体组成、有机碳含量分布特征及微生物特性发生明显变化^[7-8]。前人的研究报道表明细菌群落结构与团聚 体稳定性有密切联系^[9]。它们可通过分泌胶结物质如胞外多糖,促进土壤团聚体的形成和稳定,提高团聚体 碳库对土壤有机碳的贡献^[6]。也有学者认为细菌群落中如 Bryobacterales, Gemmatimonadales, Rubrobacterales 等类群的变化显著降低了土壤团聚体稳定性,不利于有机碳的固存^[7]。由此可见,三者之间的相互作用仍不 清楚,有待于进一步研究。

刺槐(Robinia pseudoacacia)是黄土高原沟壑区生态建设的主要树种,在保持水土、防风固沙、固氮改土等 方面具有重要作用。近年来,该区域刺槐人工林出现了生产力低下、地力衰退等现象,对当地生态环境和区域 经济发展造成了严重影响。目前,前人已从地上部如林分结构^[10]、水分生理特征^[11]、经营方式^[12]开展了大 量研究,而对地下部的研究主要集中在土壤养分^[13]、微生物特性^[14—15]等方面,对土壤团聚体结构及其稳定性 研究还较少^[16],严重遏制了人工林生产力的提升及生态功能的发挥。不同林龄刺槐人工林土壤团聚体有机 碳含量、微生物群落结构是否存在差异?两者是否会对团聚体稳定性造成影响,是目前亟待解决的问题。为 此,本研究拟从刺槐人工林生长发育进程的角度对其团聚体分布、稳定性、有机碳含量及其微生物群落的变化 _____

规律进行研究,探讨团聚体细菌群落、有机碳含量及团聚体稳定性之间的互作关系。研究结果旨在揭示人工林土壤团聚体稳定性的影响机制,为人工林可持续经营及其生态功能提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省永寿县槐坪林场(108°05′—108°10′E,34°47′—34°51′N),地处渭北高原南缘,海拔 1123—1464 m。该区属暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候,年平均气温 10.8 °C,年均降雨量 610.66 mm,集 中在每年的 7—9 月。土壤类型为黄绵土。刺槐人工林约占该区域森林面积的 90%^[17]。林下草本植物以葎 草(*Humulus scandens*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、三脉紫菀(*Aster ageratoides*)、天名精(*Carpesium abrotanoides*)为 主。在研究区内分别选取立地条件相似的 8 年生、18 年生和 30 年生刺槐人工林为研究对象,以刚撂荒的农 耕地作为对照(CK)。各林地分别设置 3 个 20 m × 20 m 的样方,相邻样方的间距>20 m,共计 12 个样方。具 体样地概况见表 1。

	Table	1 Basic inform	ation of sampli	ng sites in <i>Robinia</i>	<i>a pseudoacacia</i> pla	antation with di	fferent ages	
林龄 Stand age/a	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	含水量 Soil moisture/%	凋落物量 Litter biomass/ (g/m ²)	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	郁闭度 Canopy density/%
СК	1170	8	16.18	18.67	_	_	_	_
8	1233	11	17.48	286.55	1550	6.7	7.82	0.65
18	1332	13	19.91	328.79	1142	11.04	8.68	0.72
30	1370	10	14.45	468.37	950	19.93	12.61	0.82

表1 不同林龄刺槐人工林样地概况

CK:刚撂荒的农耕地;DBH:胸径 Diameter at breast height

1.2 土壤样品采集与处理

土壤样品于 2019 年 8 月采集。各样方内,沿"S"型曲线随机选取 5 个样点,去除凋落物后,用铝盒分别采 集 0—20 cm 土层的原状土样,装入 4 ℃保温箱带回实验室。沿自然裂隙将原状土壤轻轻掰开,去除石块和动 植物残体,将同一样方 5 个样点的土壤混合为一个样品,共计 12 个土样。

1.3 土壤团聚体筛分

根据 Upton 等的文献^[18],采用最适湿度筛分法(optimal moisture sieving procedure)对团聚体进行筛分。将 原状土样置于含有无菌硅胶干燥剂的铝盒中,4℃下密闭干燥至土样含水量约为10%,随后称取100g处理后 的土样置于无菌筛组(自上而下为2 mm 筛子、0.25 mm 筛子和底盒)的最上层,将筛组置于机械筛上,以 120 次/min的频率震荡2 min,由此获得>2 mm、2—0.25 mm 和<0.25 mm 粒径团聚体样品。在每次筛分后用 酒精对筛子、底盒进行擦拭,避免杂菌污染。将各粒径团聚体样品分为两份,一份自然风干,用于测定化学特 性,一份置于-80℃冰箱储存,用于细菌群落高通量测序。

1.4 团聚体化学特性测定

团聚体有机碳、pH、全氮和全磷的测定参照鲍士旦^[19]的方法进行。其中有机碳测定采用重铬酸钾外加 热法。pH 值采用 pH 计(雷磁 PHS-3C) 测定。全氮采用 H₂SO₄ 消煮—凯氏定氮仪测定。全磷采用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮,钼锑抗比色法测定。

1.5 团聚体细菌群落高通量测序

使用 OMEGA Soil DNA Kit(D5625-01)(Omega Bio-Tek, Norcross, GA, USA)提取土壤 DNA 样品。所用 引物为 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')。扩增反应体 系:5 μL 缓冲液、0.25 μL Fast pfu DNA Polymerase、2 μL dNTPs、正、反向引物 2 μL、1 μL DNA 模板和 14.75 μL ddH₂O。扩增反应条件:98 ℃下初始变性 5 min,98 ℃下变性 30 s、53 ℃下退火 30 s、在 72 ℃下延伸 45 s,在 72 ℃下最终延伸 5 min,共 25 个循环。测序在派森诺公司 Illumina Hi Seq platform 平台完成(上海派森诺生物 科技有限公司,上海,中国)。所得序列在 97%的相似性水平上对 OTU 序列进行聚类分析,选用 Greengenes 数 据库(Release 13.8, http://greengenes.secondgenome.com/)比对,进行物种注释。

1.6 数据分析

文中,>0.25 mm 粒径团聚体含量($R_{>0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(D)的计算公式^[20]如下:

$$R_{>0.25} = \frac{x_{>0.25}}{w_0} \times 100\% \tag{1}$$

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} \bar{x}_{i} w_{i}$$
⁽²⁾

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^{n} w_i \ln \bar{x}_i\right)$$
(3)

$$D = 3 - \frac{\lg[w(\delta < \bar{x}_i)/w_0]}{\lg(\bar{x}_i/x_{\max})}$$

$$\tag{4}$$

式中, $x_{>0.25}$ 为>0.25 mm 粒径团聚体质量之和; w_0 为各粒径团聚体质量总和; \bar{x}_i 为 i 粒级团聚体的平均直径 (mm), w_i 为 i 粒级团聚体的质量百分比(%),n 为团聚体的总级数, x_{max} 为最大粒径平均值, $w(\delta < \bar{x}_i)$ 为小于 i 粒径的土壤质量。

采用 SPSS 23.0 软件进行单因素方差分析。采用 R 软件的"ggplot2"包进行柱形图可视化,"vegan"包进 行主坐标分析、置换多元方差分析和冗余分析。使用 Amos 软件构建各粒径团聚体细菌群落、有机碳和稳定 性之间的结构方程模型。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体组成及稳定性

由表 2 可知,不同林龄人工林均以大团聚体(>0.25 mm)为主,含量为 92.74%—95.78%,显著高于 CK。 各林龄人工林中,团聚体组成均表现为>2 mm 团聚体含量最高,其次是 2—0.25 mm 团聚体和<0.25 mm 团聚 体。随着林龄的增加,>2 mm 粒径的团聚体含量无显著变化。2—0.25 mm 粒径的团聚体含量呈现先增加后 减少的趋势,30 年生林地含量最低,较 18 年生林地显著减少 43.51%。<0.25 mm 粒径的团聚体含量逐渐下 降,在 30 年生林地中出现最小值,为 4.22%,显著低于 8 年生林地和 CK。

	Table 2 Soil aggregate comp	oosition in Robinia pseudoaca	cia plantation with different	ages
林龄	团要	P		
Stand age/a	>2 mm	2—0.25 mm	<0.25 mm	R>0.25
СК	54.25±7.65b	33.91±3.14a	11.84±1.31a	88.16±1.31c
8	69.32±0.48a	$23.42 \pm 0.66 \text{bc}$	$7.26 \pm 0.20 \mathrm{b}$	$92.74 \pm 0.20 \mathrm{b}$
18	64.31±3.40a	31.07 ± 3.46 ab	$4.62 \pm 0.09 \mathrm{c}$	95.38±0.08a
30	74.13±1.83a	$21.65 \pm 1.66c$	4.22±0.17c	95.78±0.17a

同列数值后不同小写字母表示同粒径团聚体不同林龄之间差异显著(P<0.05);R_{>0.25};>0.25 mm 粒径团聚体含量

如图 1 所示,造林后土壤团聚体稳定性指标 MWD 和 GMD 均显著高于 CK,D 值显著低于 CK。MWD 和 GMD 随林龄增加的变化规律均表现为 30 年生>8 年生>18 年生。各林龄分形维数 D 值随林龄增加逐渐降低,30 年生较 CK 和 8 年生显著降低 17.12%和 7.7%。

2.2 土壤团聚体有机碳含量

各粒径团聚体有机碳含量均表现为18年生和30年生显著高于CK和8年生。土壤有机碳含量随林龄的





增加显著增加。在>2 mm 粒径的团聚体中,以 30 年生林地最高,分别较 CK 和 8 年生增加 66.15%和 134%。 2—0.25 mm 和<0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量,随林龄增加呈现先增加后降低的趋势,均于 18 年生中有机 碳含量最高。不同林龄的林地中土壤团聚体有机碳含量均随粒径的减小而显著增加,其中以<0.25 mm 粒径 团聚体中有机碳含量最高(表 3)。

沐龄		全土		
Stand age∕a	>2 mm	2—0.25 mm	<0.25 mm	Total soil
СК	6.00±1.13Cb	6.90±0.24Dab	7.94±0.51Ca	6.60±0.31C
8	$8.45{\pm}0.16{\rm Bc}$	9.75 ± 0.16 Cb	11.98±0.25Ba	9.02±0.07B
18	$12.66{\pm}0.50{\rm Ac}$	$19.12{\pm}0.25\mathrm{Ab}$	21.02±0.33Aa	15.05 ± 0.30 A
30	14.04 ± 0.43 Ab	17.98±0.95Ba	20.80±0.50Aa	15.16±0.12A

表 3 不同林龄刺槐人工林土壤团聚体有机碳含量/(g/kg)

同列数值后不同大写字母表示同粒径团聚体不同林龄之间差异显著,同行不同小写字母表示同林龄不同粒径团聚体之间差异显著(P<0.05)

2.3 土壤团聚体细菌群落

如图 2 所示, 土壤团聚体细菌群落主要由变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteria)组成。林龄对各粒径团聚体中变形菌门无明显影响。酸杆菌门随着林龄的增加而呈现先增 加后降低的趋势, 以 18 年生林地最高。放线菌门的变化趋势与酸杆菌门相反, 8 年生和 30 年生林地平均相 对丰度值分别较 18 年生林地高出 27.42%和 10.72%。

PCoA(图3)和置换多元方差分析结果表明,不同林龄土壤团聚体细菌群落结构存在显著差异(R² = 0.4099,P<0.001),同一林龄不同粒径团聚体细菌群落结构相似(R² = 0.0422,P=0.867)。土壤有机碳、pH、全氮和全磷是影响各粒径团聚体细菌群落的主要因子(图4)。

2.4 土壤各粒径团聚体有机碳、细菌群落和土壤团聚体稳定性之间的关系

如图 5 所示,在>2 mm 粒径团聚体中,己科河菌门(Rokubacteria)既能直接提高土壤团聚体稳定性,又能 通过增加土壤有机碳含量间接提高团聚体稳定性。在 2—0.25 mm 粒径团聚体中,己科河菌门和疣微菌门 (Verrucomicrobia)对团聚体稳定性有显著正效应。在<0.25 mm 粒径团聚体中,团聚体有机碳含量对土壤团 聚体稳定性影响程度最大。



图 2 不同林龄刺槐人工林各粒径团聚体细菌门水平相对丰度 Fig.2 Relative abundances of the bacterial phyla in different aggregate sizes in *Robinia pseudoacacia* plantation with different ages

3 讨论

本研究发现刺槐人工林以>0.25 mm 粒径团聚体为 主,含量为92.74%—95.78%(表2)。据报道,>0.25 mm 粒径团聚体含量可用于评价土壤质量,其含量越高,土 壤结构越稳定,质量越好^[21]。由此可见,营造刺槐人工 林可显著改善土壤结构,提高土壤质量。这可能与造林 后林地凋落物增多(表1),土壤有机质输入量增加有 关^[22]。另一方面,植物根系和微生物通过分泌胞外多 糖等物质,通过缠绕和粘结的方式也促进了大团聚体的 形成^[9]。

土壤团聚体是有机碳的主要固定场所。团聚体粒 径对土壤有机碳的分布有明显影响。前人的研究发现 土壤有机碳主要聚集在大粒径团聚体中^[23],且土壤团 聚体有机碳含量随着团聚体粒径的增加而增加^[24]。但 是本研究结果表明不同林龄刺槐人工林均以<0.25 mm 粒径有机碳含量最高。出现不一致的原因可能与不同 粒径团聚体有机碳组分有关。Wang 等研究发现微团聚





体中含有更多难分解的有机碳组分,如木质素和脂类等^[25],不易被微生物分解。随着林龄的增长,难被微生物分解的有机碳组分如木质素等逐渐增多^[26],因此更易被包裹在微小团聚体内。本研究还发现微团聚体(< 0.25 mm)中α变形菌纲的相对丰度显著高于>2 mm 粒径团聚体(微团聚体:14.24%;>2 mm 粒径团聚体: 9.88%)。α变形菌纲属于贫营养型微生物类群,喜欢在贫瘠的环境中生长,且生长速度缓慢^[27],因此减少了 微生物对有机碳的利用,增强了微小粒径团聚体对有机碳的物理保护作用,间接证明了上述观点。目前,对黄



图 4 土壤化学特性与刺槐人工林各粒径团聚体微生物群落的冗余分析



SOC:土壤有机碳;TN:全氮;TP:全磷

土高原地区林地土壤有机碳组分的研究大多集中在全土^[28-29],对团聚体有机碳组分的研究仍有待于进一步研究。然而,本研究中由于<0.25 mm 粒径团聚体占总团聚体比例较低,导致其对土壤有机碳库的贡献率较低。

本研究中,刺槐人工林团聚体优势菌门主要为变形菌门、放线菌门和酸杆菌门。各粒径团聚体中变形菌 门的丰度值不受林龄影响,这可能与变形菌门环境适应性强有关^[30],变形菌门包含多种代谢种类,既有自养 型也有异养型,既存在光能型,也存在化能型,因此能够适应复杂环境变化并存在于多种生境中^[31]。不同林 龄刺槐人工林中,各粒径团聚体放线菌门的相对丰度均显著低于撂荒地。前人的研究表明放线菌门是典型的 寡营养型微生物,对土壤有机质等物质的需求较低,适合在养分贫瘠的环境中生长^[32]。造林后,刺槐人工林 土壤中养分含量如有机碳等显著提高^[33],不适合放线菌门的生长,从而降低了放线菌门相对丰度。此外,本 研究相关性分析结果表明团聚体放线菌门相对丰度和有机碳含量存在显著的负相关关系(*r*=-0.564,*P*< 0.001),也证明了上述结果。各粒径团聚体中酸杆菌门的变化趋势与放线菌门相反。Kanokratana 等的研究 表明酸杆菌门含有可编码纤维素酶和半纤维素酶的基因,能够降解纤维素与木质素^[34]。Zhang 等的研究发现 随着刺槐人工林的增长,凋落物中难溶解的成分如纤维素、木质素等不断积累^[26],由此引起酸杆菌门相对丰



图 5 不同林龄刺槐人工林团聚体细菌群落、有机碳及团聚体稳定性间的结构方程模型

Fig.5 Structural equation model of aggregate associated bacteria community, organic carbon and stability in *Robinia pseudoacacia* plantation with different ages

实线箭头表示正效应,虚线箭头表示负效应;箭头粗细表示模型标准化路径系数的大小;* P<0.05,** P<0.01,*** P<0.01

度显著增加。

另外,本研究发现在>2 mm 和 2—0.25 mm 粒径团聚体中,已科河菌门、芽单胞菌门和疣微菌门对团聚体 稳定性有显著正效应,表明在大团聚体中,已科河菌门、芽单胞菌门和疣微菌门是影响土壤团聚体稳定性的关 键因子。其相对丰度的的提高将增加土壤团聚体平均重量直径,稳定土壤结构。前人的研究结果表明芽单胞 菌门和疣微菌门能够分泌胞外多糖等粘结物质^[35—36],从而促进团聚体的形成。Kroeger 等发现己科河菌门含 有许多与碳氢化合物代谢过程相关的基因^[37],能够将碳氢化合物转化为有机碳从而提高团聚体稳定性。而 在小团聚体中有机碳含量对团聚体形成和稳定的贡献更大。这可能是由于<0.25 mm 粒径团聚体较 >0.25 mm粒径团聚体包裹更多的稳定有机碳,稳定有机碳对团聚体的形成稳定具有显著作用^[38]。

http://www.ecologica.cn

4 结论

(1)营造刺槐人工林显著增加了大团聚体含量、平均重量直径和几何平均直径,降低了分形维数,提高了 土壤团聚体稳定性,其中以 30 年生林地最好。

(2)随着林龄的增加,>2 mm 粒级团聚体有机碳含量呈现逐渐增加的趋势,各林龄中<0.25 mm 粒径团聚体中有机碳最高。

(3)林龄对土壤团聚体细菌群落结构有显著影响。各粒径团聚体变形菌门随林龄增加无明显变化。放 线菌门相对丰度在18年生林地中最低,随后逐渐升高。酸杆菌门变化趋势与放线菌门相反。土壤有机碳、 pH、全氮和全磷是影响各粒径团聚体细菌群落结构的主要因素。

(4)团聚体细菌门和有机碳对其稳定性产生显著影响。在>2 mm 和 2—0.25 mm 粒径团聚体中,己科河 菌门可直接对土壤团聚体稳定性产生正效应,又可通过增加有机碳间接提高团聚体稳定性。而在<0.25 mm 粒径团聚体中,团聚体有机碳含量的提高增加了团聚体稳定性。

参考文献(References):

- [1] 孙文泰,马明,牛军强,尹晓宁,董铁,刘兴禄. 陇东雨养苹果覆膜对土壤团聚体结构稳定性与细根分布的影响. 生态学报, 2022, 42 (4): 1582-1593.
- [2] 龙启霞, 蓝家程, 姜勇祥. 生态恢复对石漠化地区土壤有机碳累积特征及其机制的影响. 生态学报, 2022, 42(18): 7390-7402.
- [3] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28 (4/5): 665-676.
- [4] 沈晓琳,王丽丽,赵建宁,李刚,修伟明,杨其琛,张贵龙.耕作方式对潮土土壤团聚体微生物群落结构的影响.应用生态学报,2021, 32(8):2713-2721.
- [5] Barnett S E, Youngblut N D, Koechli C N, Buckley D H. Multisubstrate DNA stable isotope probing reveals guild structure of bacteria that mediate soil carbon cycling. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(47): e2115292118.
- [6] Redmile-Gordon M, Gregory A S, White R P, Watts C W. Soil organic carbon, extracellular polymeric substances (EPS), and soil structural stability as affected by previous and current land-use. Geoderma, 2020, 363: 114143.
- [7] Lan J C, Wang S S, Wang J X, Qi X, Long Q X, Huang M Z. The shift of soil bacterial community after afforestation influence soil organic carbon and aggregate stability in karst region. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 901126.
- [8] Gao G N, Huang X M, Xu H C, Wang Y, Shen W J, Zhang W, Yan J L, Su X Y, Liao S S, You Y M. Conversion of pure Chinese fir plantation to multi-layered mixed plantation enhances the soil aggregate stability by regulating microbial communities in subtropical China. Forest Ecosystems, 2022, 9: 100078.
- [9] Yang Y, Zhang Y E, Yu X X, Jia G D. Soil microorganism regulated aggregate stability and rill erosion resistance under different land uses. CATENA, 2023, 228: 107176.
- [10] Wang N, Bi H X, Cui Y H, Zhao D Y, Hou G R, Yun H Y, Liu Z H, Lan D Y, Jin C. Optimization of stand structure in *Robinia pseudoacacia* Linn. based on soil and water conservation improvement function. Ecological Indicators, 2022, 136: 108671.
- [11] Wang J, Fu B J, Jiao L, Lu N, Li J Y, Chen W L, Wang L X. Age-related water use characteristics of *Robinia pseudoacacia* on the Loess Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 301/302: 108344.
- [12] Lu S B, Chen Y M, Sardans J, Peñuelas J. Ecological stoichiometric comparison of plant-litter-soil system in mixed-species and monoculture plantations of *Robinia pseudoacacia*, *Amygdalus davidiana*, and *Armeniaca sibirica* in the Loess Hilly Region of China. Forest Ecosystems, 2023, 10: 100123.
- [13] Xiang Y Z, Liu Y, Yue X J, Yao B, Zhang L Y, He J, Luo Y, Xu X Y, Zong J Z. Factors controlling soil organic carbon and total nitrogen stocks following afforestation with *Robinia pseudoacacia* on cropland across China. Forest Ecology and Management, 2021, 494: 119274.
- [14] Xu M P, Lu X Q, Xu Y D, Zhong Z K, Zhang W, Ren C J, Han X H, Yang G H, Feng Y Z. Dynamics of bacterial community in litter and soil along a chronosequence of *Robinia pseudoacacia* plantations. Science of the Total Environment, 2020, 703: 135613.
- [15] 罗伶书, 王一佩, 杜盛. 模拟降雨减少对刺槐人工林土壤养分和微生物群落的影响. 生态学报, 2023, 43(14): 5916-5925.
- [16] Wang X, Zhong Z K, Li W J, Liu W C, Zhang X Y, Wu S J, Ren Z X, Wu Q M, Shen Z Y, Ren C J, Yang G H, Han X H. Effects of *Robinia* pseudoacacia afforestation on aggregate size distribution and organic C dynamics in the central Loess Plateau of China: a chronosequence approach.

- [17] 国家林业和草原局. 第九次全国森林资源清查结果(2014-2018), 2019.
- [18] Upton R N, Bach E M, Hofmockel K S. Spatio-temporal microbial community dynamics within soil aggregates. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 132; 58-68.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 李文军,杨基峰,彭保发,崔京珍. 施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响.中国农业科学,2014,47(20): 4007-4015.
- [21] Zhang Q Q, Song Y F, Wu Z, Yan X Y, Gunina A, Kuzyakov Y, Xiong Z Q. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. Journal of Cleaner Production, 2020, 242: 118435.
- [22] Ma Y, Wu H F, Hu B A, Cheng X Q, Kang F F, Han H R. Effects of *Betula platyphylla* invasion in North China on soil aggregate stability, soil organic carbon and active carbon composition of larch plantation. Plant and Soil, 2023, 486(1/2): 337-359.
- [23] Liu M, Han G L, Zhang Q. Effects of agricultural abandonment on soil aggregation, soil organic carbon storage and stabilization: Results from observation in a small karst catchment, Southwest China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 288: 106719.
- [24] Mustafa A, Xu M G, Ali Shah S A, Abrar M M, Sun N, Wang B R, Cai Z J, Saeed Q, Naveed M, Mehmood K, Núñez-Delgado A. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China. Journal of Environmental Management, 2020, 270: 110894.
- [25] Wang X Y, Zhao L X, Comeau L P, Bian Q, Jiang Y J, Mao J D, Chen Y, Sun B. Divergent carbon stabilization pathways in aggregates in Ultisols with and without organic amendments: Implications from ¹³C natural abundance and NMR analysis. Geoderma, 2022, 426: 116088.
- [26] Zhang X X, Wang L J, Zhou W X, Hu W, Hu J W, Hu M. Changes in litter traits induced by vegetation restoration accelerate litter decomposition in *Robinia pseudoacacia* plantations. Land Degradation & Development, 2022, 33(1): 179-192.
- [27] Poole P, Ramachandran V, Terpolilli J. Rhizobia: from saprophytes to endosymbionts. Nature Reviews Microbiology, 2018, 16: 291-303.
- [28] Zhao M, Li Y C, Wang Y J, Sun Y R, Chen Y M. High stand density promotes soil organic carbon sequestration in *Robinia pseudoacacia* plantations in the hilly and gully region of the Loess Plateau in China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 343: 108256.
- [29] Zhang Q Y, Jia X X, Wei X R, Shao M A, Li T C, Yu Q. Total soil organic carbon increases but becomes more labile after afforestation in China's Loess Plateau. Forest Ecology and Management, 2020, 461: 117911.
- [30] Lv X F, Yu J B, Fu Y Q, Ma B, Qu F Z, Ning K, Wu H F. A meta-analysis of the bacterial and archaeal diversity observed in wetland soils. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 437684.
- [31] 赵河. 太行山南麓主要植被恢复类型土壤微生物群落特征及分布机制研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2019.
- [32] 王雅芸,隆彦昕,李岩,王妍,吕光辉,杨建军,高兴旺,常顺利,杨晓东.胡杨土壤理化性质与微生物群落结构空间和分布的关系.生态学报,2021,41(14):5669-5684.
- [33] 张敏. 刺槐人工林土壤有机碳库变化特征及其微生物驱动机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [34] Kanokratana P, Uengwetwanit T, Rattanachomsri U, Bunterngsook B, Nimchua T, Tangphatsornruang S, Plengvidhya V, Champreda V, Eurwilaichitr L. Insights into the phylogeny and metabolic potential of a primary tropical peat swamp forest microbial community by metagenomic analysis. Microbial Ecology, 2011, 61(3): 518-528.
- [35] Zhang J, Shi Q, Fan S K, Zhang Y F, Zhang M H, Zhang J F. Distinction between Cr and other heavy-metal-resistant bacteria involved in C/N cycling in contaminated soils of copper producing sites. Journal of Hazardous Materials, 2021, 402; 123454.
- [36] Fawaz M N. Revealing the ecological role of gemmatimonadetes through cultivation and molecular analysis of agricultural soils [D]. Knoxville: University of Tennessee, 2013.
- [37] Kroeger M E, Delmont T O, Eren A M, Meyer K M, Guo J R, Khan K, Rodrigues J L M, Bohannan B J M, Tringe S G, Borges C D, Tiedje J M, Tsai S M, Nüsslein K. New biological insights into how deforestation in *Amazonia* affects soil microbial communities using metagenomics and metagenome-assembled genomes. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1635.
- [38] Wu Q C, Jiang X H, Lu Q W, Li J B, Chen J L. Changes in soil organic carbon and aggregate stability following a chronosequence of *Liriodendron* chinense plantations. Journal of Forestry Research, 2021, 32(1): 355-362.