

不同林龄工矿废弃地土壤团聚体稳定性与有机碳固持关联性

赵宇萱, 王笑峰, 温玉强
(黑龙江大学 水利电力学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 为探究植被恢复对工矿废弃地土壤团聚体结构及有机碳动态的影响机制, 以鹤岗市青岭林场工矿废弃地上不同种植年限 (18、20、23、32 a) 的樟子松人工林为研究对象, 通过野外采样与室内分析相结合的方法, 系统测定 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤团聚体粒径分布、有机碳质量分数及主要土壤化学因子 (pH、全氮和全磷等)。研究表明, 1) 随着植被恢复年限的增长, 土壤团聚体结构发生显著变化, 其中, >2 mm 大团聚体比例呈现显著增加趋势 (增幅达 50.76%), <0.25 mm 微团聚体比例显著降低 (降幅为 44.24%), 平均重量直径 (mean weight diameter, MWD) 和几何平均直径 (geometric mean diameter, GMD) 分别增加了 17.90% 和 18.42%, 表明土壤团聚体稳定性随林龄增加而显著增强。2) 通过 Mantel 分析发现, 林龄、土壤深度和化学因子对土壤有机碳 (SOC) 积累具有极显著影响 ($P<0.01$), 同时, 林龄和化学因子对团聚体稳定性具有显著影响 ($P<0.05$), 其中, 表层土壤 (0~20 cm) 与深层土壤 (20~40 cm) 的变化趋势基本一致, 但深层土壤对环境因子的响应相对滞后。3) 随机森林分析显示, 氨态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、pH、全磷 (TP) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 等对土壤团聚体稳定性的解释度最高。综上所述, 长期植被恢复可有效改善工矿废弃地土壤结构, 促进土壤有机碳的积累与固存, 这对退化生态系统的恢复与重建提供新的思路。

关键词: 工矿废弃地; 土壤团聚体; 有机碳质量分数; 生态修复; 煤矸石; 环境治理; 鹤岗市; 理化指标
中图分类号: S714 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7525/j.issn.1006-8023.2026.01.004

The Correlation Between Soil Aggregate Stability and Organic Carbon Retention in Industrial and Mining Wastelands with Different Forest Ages

ZHAO Yuxuan, WANG Xiaofeng, WEN Yuqiang
(School of Hydraulic and Electric-Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to explore the impact mechanism of vegetation restoration on soil aggregate structure and organic carbon dynamics in industrial and mining wastelands, *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations with different planting years (18, 20, 23, 32 years) on industrial and mining wastelands in Qingling Forest Farm, Hegang City were studied. By combining field sampling and indoor analysis, the particle size distribution of soil aggregates, organic carbon mass fraction, and main soil chemical factors (pH, total nitrogen, and total phosphorus, etc.) in the 0-20 cm and 20-40 cm soil layers were systematically measured. The research results indicated that: 1) With the increase of vegetation restoration years, the structure of soil aggregates underwent significant changes. Among them, the proportion of large aggregates larger than 2 mm showed a significant increase trend (an increase of 50.76%), while the proportion of micro aggregates smaller than 0.25 mm decreased significantly (a decrease of 44.24%). The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) increased by 17.90% and 18.42%, respectively, indicating that the stability of soil aggregates was significantly enhanced with increasing forest age. 2) Through Mantel analysis, it was found that forest age, soil depth, and chemical factors had a significant impact on soil organic carbon (SOC) accumulation ($P<0.01$).

收稿日期: 2025-04-02

基金项目: 黑龙江省松花江干流治理工程科学研究试验项目 (SGZL/KY-10)。

第一作者简介: 赵宇萱, 硕士研究生。研究方向为退化生态系统保护与修复。E-mail: zhaoyx5977@163.com

* 通信作者: 王笑峰, 博士, 教授。研究方向为退化生态系统保护与修复。E-mail: 1990033@hlju.edu.cn

引文格式: 赵宇萱, 王笑峰, 温玉强. 不同林龄工矿废弃地土壤团聚体稳定性与有机碳固持关联性[J]. 森林工程, 2026, 42(1): 35-43.

ZHAO Y X, WANG X F, WEN Y Q. The correlation between soil aggregate stability and organic carbon retention in industrial and mining wastelands with different forest ages[J]. Forest Engineering, 2026, 42(1): 35-43.

At the same time, forest age and chemical factors had a significant impact on aggregate stability ($P < 0.05$). The trend of changes in surface soil (0–20 cm) and deep soil (20–40 cm) was basically consistent, but the response of deep soil to environmental factors was relatively lagging behind. 3) Random forest analysis showed that ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), pH, total phosphorus (TP), and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) had the highest explanatory power for soil aggregate stability. In summary, long-term vegetation restoration can effectively improve the soil structure of industrial and mining wastelands, promote the accumulation and sequestration of soil organic carbon, and provide new ideas for the restoration and reconstruction of degraded ecosystems.

Keywords: Industrial and mining wasteland; soil aggregates; organic carbon content; ecological restoration coal gangue; environmental governance; Hegang City; physical and chemical indicators

0 引言

土壤团聚体是构成土壤结构的基本单元,由有机质胶结形成,是土壤结构的物质基础和肥力的重要载体^[1]。同时,团聚体也是储存土壤有机碳(SOC)的主要场所。作为评估土壤质量的关键指标,SOC在生态系统中扮演着核心角色,是支撑土壤多种重要生态功能的基础性物质^[2]。研究表明,土壤中有有机碳的损失会导致空气中二氧化碳的增加,这也反映了SOC对于温室效应的间接影响。因此,土壤团聚体不仅能保持土壤稳定,还能通过维持土壤有机碳的形式减缓全球变暖^[3-4]。目前关于土壤团聚体稳定性的研究多聚焦于森林、草原及农田等典型生态系统类型。例如,甘安琪等^[5]研究了放牧强度对高寒草地土壤团聚体稳定性及有机碳质量分数的影响,发现不同放牧强度显著改变了土壤团聚体的分布及其有机碳储存能力,表明人为干扰对土壤结构的稳定性具有深远影响。吴嘉俊等^[6]通过探讨水稻秸秆生物炭施用对稻田土壤团聚体稳定性及其碳氮分布的影响,揭示了外源有机物料对土壤团聚体形成和碳氮固持的促进作用,为农田土壤改良提供了理论依据。目前,对于不同修复年限退化生态系统土壤团聚体的研究非常有限。随着全球对生态文明建设的重视,退化后生态系统恢复与重建的研究十分关键。

鹤岗市蕴藏着丰富的以煤炭为主的矿产资源,是我国重要的煤炭生产区域,因此存在大量矸石废弃地。矸石中可能含有重金属、放射性元素等有害物质,这些物质在自然作用下渗入土壤和地下水,破坏原有的生态系统。本研究以鹤岗市为例,通过对矸石废弃地生态恢复过程的研究,深入探讨土壤团聚体稳定性及其有机碳组分的变化特征。根据工矿废弃地的特点,在土壤团聚体尺度上,探讨生态修复过程中土壤团聚体稳定性、SOC质量分数的变化及其影响因子。通过综合分析相关研究成果,揭示土壤团聚体稳定性及其与碳氮分布的内在联系,为土壤质量提升和生态系统可持续管理提供科学依据,夯实农业与林业的发展基础,并且对区域生态修复具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于鹤岗市青岭林场的排矸区造林地,中心点地理坐标为 $130^{\circ}32'37''\text{E}$, $47^{\circ}39'93''\text{N}$ 。鹤岗矿区属于亚寒带大陆性季节气候,年平均气温为 3.8°C ,冬季漫长且夏季短暂,每年雨季为6—8月,年平均降水量 651.5 mm ,地表水和地下水资源丰富。该排矸区占地万余亩,按照年份差异将整体区域划分为4个造林分区,各区域统一选用樟子松作为主要树种,恢复年限分别为18、20、23、32 a。

1.2 样品采集

本研究采用典型样地法对样地进行设置,为确保样地的代表性和独立性,每种造林年限随机设置3块 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的样方,样方间最小间隔距离大于 50 m ,共设置12个标准样地。在每个样地内,分别采集0~20 cm和20~40 cm土层的土壤。每个土层采集3个重复样品,去除杂质后,经充分混合后构成一个混合土样,共采集24个土壤样品。样品采集后立即进行现场处理:首先使用电子天平测定土壤鲜质量,随后将样品装入无菌自封袋中运送至实验室风干至恒重并记录。风干后的土样去除植物根系、石块及凋落物等杂质后均分为2份:一份保持原状,用于测定土壤团聚体组成及稳定性,每个指标测定设置3次重复;另一份研磨后过 2 mm 筛,用于测定土壤pH、有机质质量分数、全氮和全磷等基本理化性质,所有测定均按照标准方法进行,确保数据的准确性^[7]。

1.3 试验设计

1.3.1 土壤团聚体占比及稳定性指标计算

对土壤团聚体的测定采用湿筛法。本研究采用平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)和分形维数(fractal dimension, D)来表征土壤团聚体稳定性。

1) 平均重量直径(MWD, 式中记为 M_{WD})计算公式为

$$M_{WD} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (1)$$

式中: \bar{x}_i 为各粒级水稳性团聚体平均直径,mm; w_i 为各粒级水稳性团聚体质量分数,%。

2)几何平均直径(GMD,式中记为 G_{MD})计算公式为

$$G_{MD} = \exp \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right\} \quad (2)$$

3)分形维数 D 的计算公式为

$$D = 3 - \frac{\lg \left(\frac{M_{r < \bar{x}_i}}{M_t} \right)}{\lg \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{max}} \right)} \quad (3)$$

式中: $M_{r < \bar{x}_i}$ 表示粒径小于 x_i 的团聚体的质量,g; M_t 表示测定团聚体的总质量,g; x_i 表示某一粒级的平均直径,mm; x_{max} 表示团聚体的最大直径,mm。

1.3.2 土壤化学因子测定

土壤pH的测定使用精度为0.01的pH计,按照水土比2.5:1的比例进行测定。土壤有机碳质量分数采用重铬酸钾容量-外加加热法测定。土壤全氮(TN)、全磷(TP)、氨态氮(NH_4^+-N)、硝态氮($NO_3^- -N$)采用元素分析仪进行测定。所有测定过程均设置空白对照和标准样品进行质量控制,试验数据均经过3次重复测定,相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)控制在5%以内。上述测定方法均参照《森林土壤分析方法》^[7]。

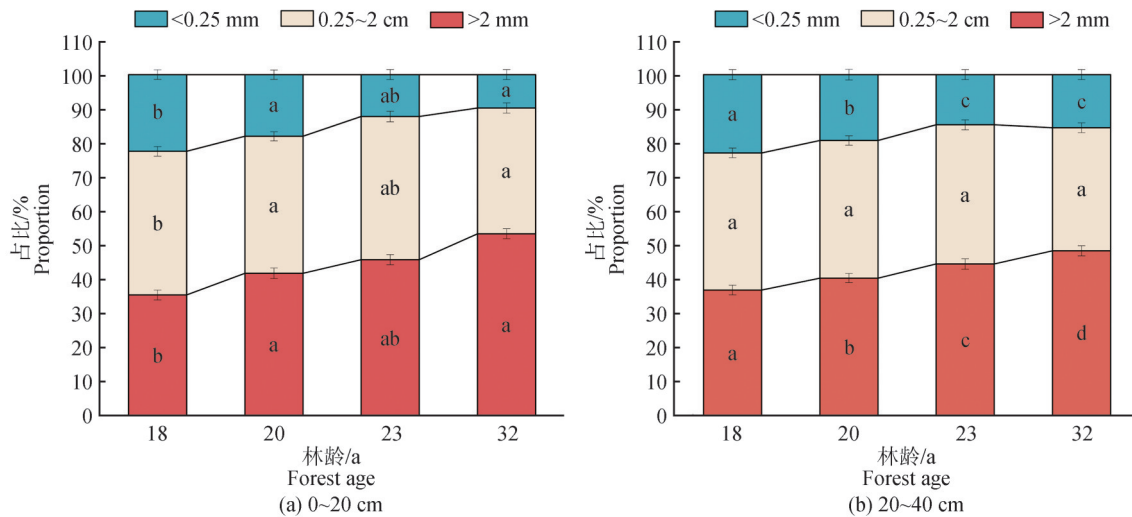
1.4 数据处理

数据处理与分析主要通过 Microsoft Excel 2019、SPSS 26.0 和 Origin 2022 等软件完成。首先,针对不同造林年限和土壤深度的土壤团聚体稳定性及土壤有机碳质量分数进行单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA),以揭示造林年限和土层深度对土壤结构稳定性的影响。其次,运用皮尔逊相关性分析,探讨土壤团聚体稳定性指标(如MWD、GMD等)与林龄、土壤深度之间的相关关系,以量化各因素对土壤团聚体稳定性的影响程度。为进一步明确环境因子的作用机制,采用 Mantel 检验分析土壤环境因子(如pH、养分等)与土壤团聚体稳定性之间的空间相关性。同时,运用随机森林(Random Forest, RF)算法定量评估各环境因子对土壤团聚体稳定性的相对贡献率。所有统计分析均设置显著性水平 $\alpha=0.05$ 以确保研究结果的可靠性。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体粒径组成特征

土壤团聚体占比分布如图1所示。随着林龄的增加,土壤团聚体中粒径>2 mm的比例总体呈上升趋势,平均上升了50.76%,土壤中粒径<0.25 mm的团聚体比例呈下降趋势,平均下降了44.24%。粒径在0.25~2.00 mm的团聚体比例在不同林龄和土层中变化不大,基本保持在36%~42%,无明显的上升或下降趋势。从土壤深度来看,上、下层土壤团聚体中粒径>2 mm团聚体比例总体均呈上升趋势,粒径<0.25 mm团聚体比例总体均呈下降趋势。



结果为平均值±标准误差;小写字母表示各处理组间差异($P < 0.05$)。

The results are presented as mean ± standard error; lowercase letters indicate the differences among the treatment groups ($P < 0.05$).

图1 土壤团聚体占比分布

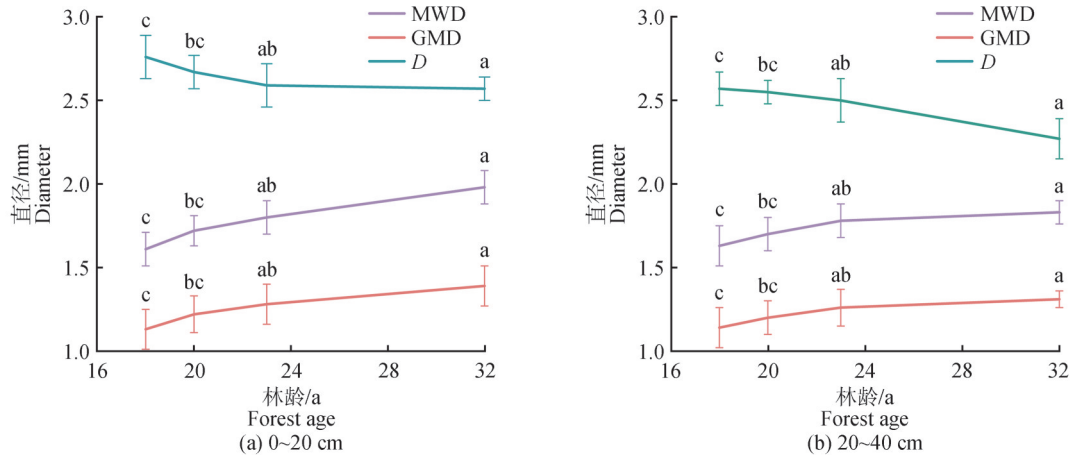
Fig. 1 Distribution map of soil aggregate proportion

根据单因素方差分析可知,粒径 >2 mm ($F=12.76$, $P=0.0012$)和粒径 <0.25 mm ($F=9.84$, $P=0.0035$)的占比受林龄影响显著($P<0.05$)。0.25~2.00 mm 粒径在各林龄均占比无显著差异($P\geq 0.05$)。进一步对存在显著性的粒径进行多重比较可知:粒径 >2 mm 土壤团聚体占比显著增加,32 a 年林龄占比最高,为53.34%,显著高于其他林龄($P<0.05$),18、20、23、32 a 之间差异显著($P<0.05$)。说明随着林龄增加,大团聚体的占比显著上升。粒径0.25~2.00 mm 的土壤团聚

体不同林龄间的占比均无显著差异($P\geq 0.05$),说明该粒径受林龄影响小。粒径 <0.25 mm 的土壤团聚体占比显著减少,18 a 林龄占比最高,为22.51%,显著高于20、23、32 a ($P<0.05$),23 a 和32 a 之间无显著差异。

2.2 土壤团聚体稳定性特征

由图2可知,樟子松人工林土壤团聚体的MWD值和GMD值逐渐增大,上层土壤MWD和GMD的值普遍大于下层。D逐渐减小,上层土壤的D普遍大于下层土壤。



结果为平均值±标准误差;小写字母表示各处理组间差异($P<0.05$)。

The results are presented as mean \pm standard error; lowercase letters indicate the differences among the treatment groups ($P<0.05$).

图2 MWD、GMD、D变化趋势

Fig. 2 Trend chart of MWD, GMD, and D Changes

随着林龄的增加,MWD值显著增加,18~32 a,平均增加了17.90%,林龄32 a的MWD显著高于其他林龄($P<0.05$),18、20、23 a林龄间的差异不显著($P\geq 0.05$),并且上下层差异随林龄增长而增大(0.02 mm 上升至0.15 mm)。GMD与MWD类似,林龄32 a的GMD显著高于其他林龄($P<0.05$),18、20、23 a林龄间的差异不显著($P\geq 0.05$),18~32 a,平均增加了18.42%,且上下层差异随林龄增长而增大(0.01 mm 上升至0.08 mm),进一步表明土壤团聚体粒径增大,土壤团聚体稳定性增强,且表层土壤的团聚体稳定性强于深层土壤。D总体呈下降趋势,18~32 a,平均下降了5.64%。林龄18 a的D显著高于其他林龄($P<0.05$),而20、23、32 a之间的D差异不显著($P\geq 0.05$)。0~20 cm 土层的D普遍高于20~40 cm 土层,上下层差异随林龄增长而减小(由0.18下降至0.11)。

结合土壤团聚体粒径组成特征,对不同粒径的团聚体稳定性分析得出,粒径 >2 mm 的团聚体具有较高的稳定性,其抵抗外力破坏的能力较强。中等粒径的团聚体在土壤中起到过渡作用,既具有一定的稳定性,又容易被外力破坏。小粒径团聚体的稳定性较低,容

易被外力破坏,导致土壤结构退化。

根据皮尔逊相关系数分析林龄、土壤深度与MWD、GMD、D之间的相关性,见表1。林龄与MWD、GMD的皮尔逊相关系数分别为0.912和0.923,表明林龄与MWD、GMD之间存在较强的正相关关系,即随着林龄的增加,土壤团聚体的稳定性显著提高。林龄与D的皮尔逊相关系数为-0.123,表明林龄与D之间存在较弱的负相关关系。即随着林龄的增加,土壤D有所降低。土壤深度与MWD、GMD的皮尔逊相关系数分别为-0.152和-0.179,表明土壤深度与MWD、GMD之间存在较弱的负相关关系。即深层土壤(20~40 cm)的团聚体稳定性略低于表层土壤(0~20 cm)。土壤深度与D的皮尔逊相关系数为-0.061,表明土壤深度与D之间的相关性较弱,几乎可以忽略。

2.3 土壤团聚体有机碳(SOC)质量分数特征

SOC质量分数随林龄增加总体呈上升趋势,0~20 cm 土层SOC质量分数普遍低于20~40 cm 土层,如图3所示。随着林龄增长,SOC质量分数显著增加($P<0.05$),深层土壤的SOC质量分数变化不明显。幼龄林阶段SOC主要集中在深层土壤,中龄林阶段SOC在表

表 1 皮尔逊相关性矩阵表
Tab. 1 Pearson correlation matrix

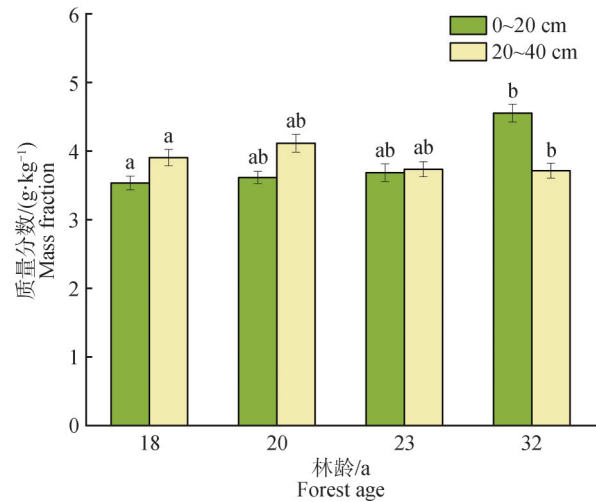
林龄/a Forest age	土壤深度/cm Soil depth	MWD/mm	GMD/mm	D	
林龄/a Forest age	1.000				
土壤深度/cm Soil depth	-0.073	1.000			
MWD/mm	0.912	-0.152	1.000		
GMD/mm	0.923	-0.179	0.987	1.000	
D	-0.123	-0.061	-0.056	-0.078	1.000

层和深层土壤中的分布趋于均衡。成熟林阶段SOC主要集中在表层土壤。

由图 3 可知, 18~32 a, SOC 质量分数平均增加了 28.81%, 通过多重比较分析得出, 32 a 林龄的 SOC 质量分数最高, 为 4.56 g/kg, 显著高于 18 a 林龄 ($P < 0.05$), 但与 20 a 林龄、23 a 林龄无显著差异 ($P \geq 0.05$)。18 a 林龄的 SOC 质量分数最低, 为 3.54 g/kg, 且与 20 a 林龄和 23 a 林龄无显著差异 ($P \geq 0.05$)。在 0~40 cm 土层范围, SOC 分布较均匀, 土壤深度对 SOC 质量分数的影响不显著 ($P \geq 0.05$)。

2.4 土壤因子与团聚体稳定性及 SOC 质量分数的关系

由表 2 可知, 不同林龄间 pH 无显著差异 ($P \geq 0.05$)。林龄对 SOC 影响显著, 32 a 林龄的 SOC 显著高于其他组 ($P < 0.05$) (0~20 cm), 可能与长期有机质积累有关; 其他林龄间差异不显著 ($P \geq 0.05$)。林龄对 TP



结果为平均值±标准误差; 小写字母表示各处理组间差异 ($P < 0.05$)。

The results are presented as mean ± standard error; lowercase letters indicate the differences among the treatment groups ($P < 0.05$).

图 3 土壤团聚体 SOC 质量分数变化

Fig. 3 Changes in soil aggregate SOC content

影响显著, 23 a 和 32 a 林龄的 TP 较高, 18 a 林龄 TP 最低, 显著低于其他林龄 ($P < 0.05$)。林龄对 TN 影响极显著 ($P < 0.01$), TN 随林龄增加显著上升, 32 a 林龄 TN 达到最高值, 并且各林龄间差异显著 ($P < 0.05$)。林龄对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 影响极其显著 ($P < 0.001$), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数随林龄显著增加, 32 a 林龄最高, 显著高于其他林龄, 并且各林龄间差异显著。林龄对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 影响显著 ($P < 0.05$)。18 a 林龄 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 显著高于其他组, 其他林龄间差异不显著 ($P \geq 0.05$), 说明幼龄林硝化作用较强或氮利用效率较低。

表 2 不同造林年限不同土层土壤化学因子

Tab. 2 Soil chemical factors in different soil layers with different afforestation years

林龄/a Forest age	土壤深度/cm Soil depth	pH	SOC/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	$\text{NH}_4^+\text{-N}/$ (g·kg ⁻¹)	$\text{NO}_3^-\text{-N}/$ (g·kg ⁻¹)
18	0~20	6.59 ± 0.12a	3.54 ± 0.37a	0.34 ± 0.16a	1.08 ± 0.10a	2.33 ± 0.17a	5.69 ± 0.16a
	20~40	6.70 ± 0.22a	3.91 ± 0.26a	0.34 ± 0.07a	0.71 ± 0.05a	1.77 ± 0.07a	2.89 ± 0.15a
20	0~20	6.24 ± 0.35a	3.62 ± 0.09a	0.57 ± 0.14ab	1.39 ± 0.26b	3.96 ± 0.25b	2.19 ± 0.09b
	20~40	6.61 ± 0.17a	4.12 ± 0.10a	0.41 ± 0.05ab	1.03 ± 0.09b	3.54 ± 0.14b	1.26 ± 0.26b
23	0~20	6.74 ± 0.41a	3.69 ± 0.21a	0.65 ± 0.14b	1.79 ± 0.14c	4.44 ± 0.33c	2.43 ± 0.34b
	20~40	6.86 ± 0.12a	3.74 ± 0.44a	0.33 ± 0.05b	1.32 ± 0.05c	3.79 ± 0.31c	1.58 ± 0.09b
32	0~20	6.76 ± 0.27a	4.56 ± 0.15b	0.68 ± 0.09b	2.27 ± 0.05d	7.84 ± 0.16d	1.60 ± 0.14b
	20~40	6.84 ± 0.19a	3.72 ± 0.29b	0.36 ± 0.07b	1.98 ± 0.18d	4.47 ± 0.17d	1.73 ± 0.10b

注: 结果为平均值±标准误差; 小写字母表示不同林龄土壤团聚体化学指标组间差异 ($P < 0.05$)。

Note: The results are presented as the mean value±standard error; lowercase letters indicate the differences in the chemical indices of soil aggregates among different forest age groups ($P < 0.05$).

Mantel 检验结果揭示了在造林过程中林龄、土壤深度和化学因子对土壤团聚体稳定性和SOC积累的显著影响,如图4(a)所示。具体而言,林龄(FA)、土壤深度(SD)、SOC、TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是影响土壤团聚体稳定性的主要环境因子。这些因子在不同程度上调控了土壤团聚体的形成和稳定性,进而影响了土壤有机碳的积累过程。化学因子如pH、SOC、TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与上层土壤的GMD和MWD呈显著正相关关系,表明上层土壤的团聚体稳定性更容易受到这些化学因子的影响。然而,环境因子与 D 之间并未表现出显著的相关性,甚至在某些情况下,TN和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 D 呈现出负相关关系。

在随机森林模型中,经预试验与调参测试,将树数

量设置为50棵。为了更准确地评估模型性能,采用10折交叉验证。此外,在交叉验证过程中,同步监测模型的均方误差(mean squared error, MSE)、决定系数(R^2)等指标,进一步优化模型参数,为控制模型复杂度,将节点分裂所需的最小样本数设置为3,避免模型在局部数据上过拟合。随机森林分析进一步量化了各环境因子对土壤团聚体稳定性的影响。结果显示, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、pH和TP对MWD的解释量最高,如图4(b)所示, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP和SOC对GMD的解释量最高,如图4(c)所示,pH、TP和NO对 D 的解释量最高,如图4(d)所示,尽管 D 与其他环境因子的相关性较弱,但这一结果仍表明这些因子在调控土壤团聚体分形维数方面具有一定的重要性。

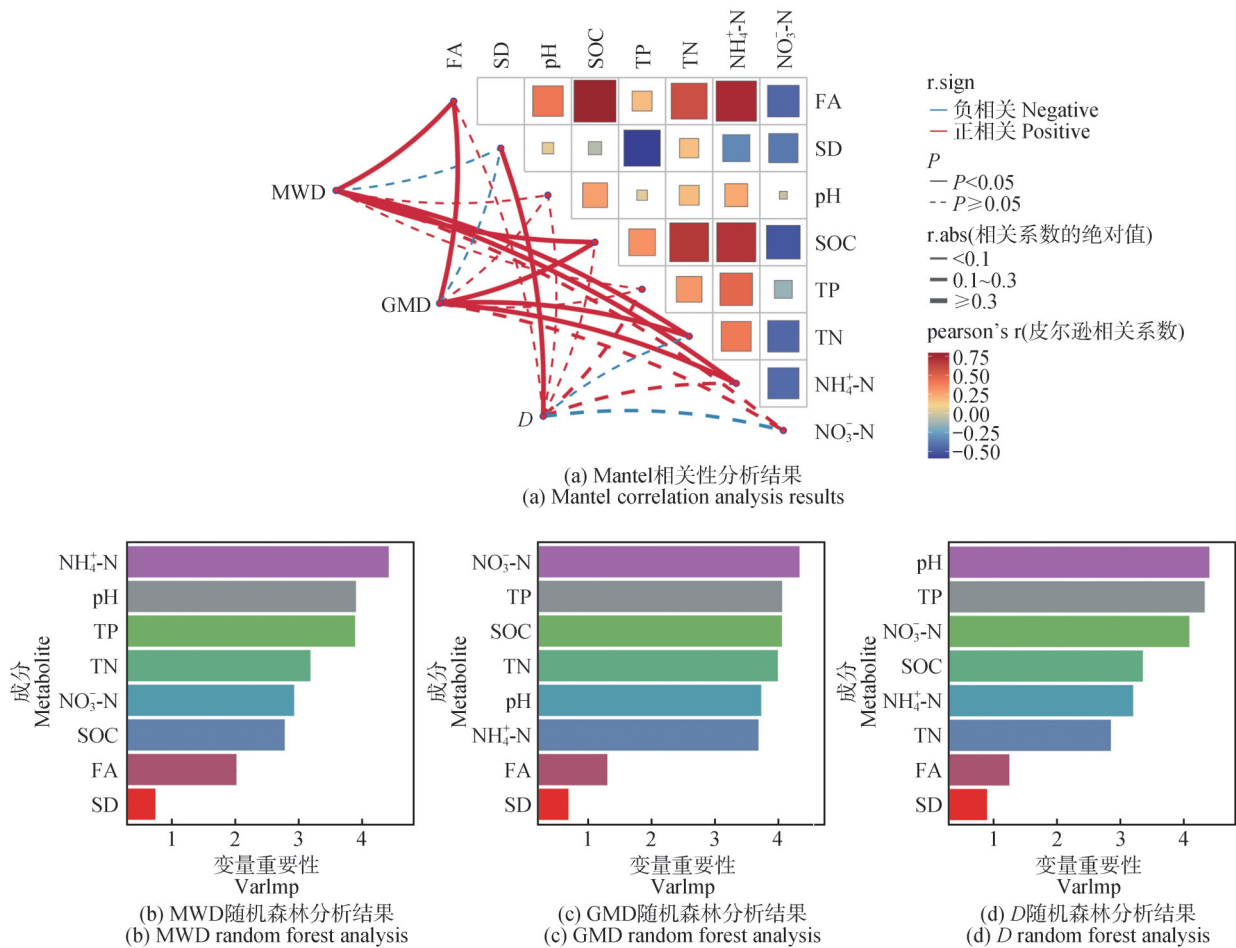


图4 土壤因子与团聚体稳定性的关系

Fig. 4 Relationship between soil factors and aggregate stability

上述研究结果表明,在造林过程中,林龄、土壤深度和化学因子共同作用于土壤团聚体的稳定性和SOC的积累。不同环境因子在不同土壤层次中对团聚体稳定性的影响存在显著差异,尤其是在上层土壤中,化学因子的作用更为突出。

3 讨论

3.1 土壤团聚体粒径分布及稳定性变化

随着林龄增长,大团聚体、微团聚体所占比例显著变化($P < 0.05$),中等粒径团聚体比例相对稳定($P >$

0.05),这一结果与Tisdall等^[8]研究结果一致。表明林龄是影响土壤团聚体稳定性的主要因素,随着林龄的增加,土壤团聚体稳定性显著提高。土壤深度对土壤团聚体稳定性的影响不显著($P \geq 0.05$),深层土壤的团聚体稳定性略低于表层土壤,但差异随林龄增长而逐渐减小,表明深层土壤的团聚体结构也在逐步改善^[9]。可能由于林龄增长,凋落物和根系输入增加,促进团聚体形成,根系网络扩展增强了土壤结构的稳定性并且表层土壤受植被影响更直接。随着林木的生长,根系活动和有机质的积累改变了土壤结构,导致较大颗粒物比例增加。林龄对土壤粒径分布的影响在上层和下层土壤中表现出相似的趋势,但上层土壤的变化幅度更大。总体来看,随着林龄的增加,土壤的粒径分布趋向于粗粒化,即大颗粒增加,小颗粒减少。反映了土壤成熟度的提高和生态系统修复的进展。因此建议:通过增加有机质输入促进土壤团聚体形成,减少人为干扰,保持土壤结构完整性^[10];适当保留林下植被,增加根系网络密度,从而改善森林生态系统功能^[11]。

3.2 土壤有机碳变化特征

土壤团聚体中的有机碳(SOC)质量分数是评价土壤肥力和生态系统功能的重要指标。团聚体作为土壤结构的基本单元,其SOC质量分数特征反映了有机碳的分布、稳定性和动态变化。林龄对SOC质量分数影响显著($P < 0.05$),土壤深度对SOC质量分数的影响不显著($P \geq 0.05$)。0~20 cm表层土壤的SOC质量分数总体呈现上升趋势,这种变化与森林生态系统的发育阶段密切相关。具体而言,在幼龄林阶段,表层土壤SOC质量分数相对较低,可能由于森林生态系统尚未完全建立,植被覆盖度较低,凋落物输入量有限。随着林龄的增长,森林生态系统逐渐成熟,植被生物量增加、根系分泌物增加,使得土壤SOC质量分数呈现持续积累的趋势^[12]。深层土壤的SOC质量分数变化呈现出与表层土壤不同的特征。对23~32 a的观测发现,深层土壤SOC质量分数变化幅度较小,表现出相对稳定的特征。说明深层土壤受到的外界干扰较少,微生物活性相对较低,有机质分解速率较慢,从而形成了较为稳定的有机碳库^[13]。

从生态系统演替的角度来看,不同林龄的SOC分布特征具有明显的差异性^[14]。在幼龄林阶段,有机质主要集中在深层土壤,这可能是由于凋落物分解后产生的有机碳向深层土壤迁移所致。在中龄林阶段,有机质在表层和深层土壤中的分布趋于均衡,反映了生态系统逐渐趋于稳定的特征^[15-16]。到了成熟林阶段,有机质主要集中在表层土壤,说明凋落物积累和根系

活动对表层土壤的有机质输入起主导作用^[17]。综上所述,森林生态系统SOC的动态变化是多种生物和非生物因素共同作用的结果。理解这些变化规律对于制定科学的森林管理策略、提高土壤碳汇能力以及应对气候变化都具有重要的理论和实践意义。未来的研究应该着重关注不同森林类型、气候条件和土壤质地下SOC的动态变化特征,以期为全球碳循环研究提供更为精确的科学依据。

3.3 土壤因子对土壤团聚体稳定性的影响

林龄、土壤深度和土壤化学因子对团聚体稳定性和SOC积累均有影响,表明造林过程中植被的演替和土壤的发育过程对土壤结构的改善和碳积累具有重要意义^[17-18]。上层土壤的团聚体稳定性与化学因子呈显著正相关($P < 0.05$)^[19],说明上层土壤的化学性质对团聚体稳定性的影响更为显著。分形维数(D)与大多数环境因子无显著相关性($P \geq 0.05$)^[20],表明 D 可能受其他未测量的物理或生物因素影响,这一现象可能暗示了土壤团聚体结构的复杂性及其在不同环境条件下的响应差异。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 pH 、 TP 对MWD的解释量最高,表明这些因子在维持大团聚体稳定性方面起关键作用。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 TP 、 SOC 对GMD的解释量最高,说明这些因子对中小团聚体的形成和稳定性有重要影响。 pH 、 TP 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 对 D 的解释量最高,表明这些因子可能通过影响土壤颗粒的排列方式间接影响 D 。 D 的响应表明, D 反映了土壤结构的复杂性,其驱动机制可能与化学因子无关,而是受物理过程(如温度变化、水分运动等)或生物过程(如根系生长、微生物活动)的调控。

深层土壤由于与外界环境的物质和能量交换相对缓慢,对环境因子的响应存在明显滞后性^[15]。其原因可能在于土壤孔隙和质地等因素,限制了环境变化在土壤剖面中的传递速度。比如根系分布深度直接影响土壤中物质传输和养分循环过程,浅根系植物主要在表层土壤吸收养分和水分,对深层土壤影响有限;而深根系植物能够穿透表层土壤,将深层土壤中的养分吸收并向上运输;水分下渗速率决定了水分从表层土壤向深层土壤迁移的速度,在降水或灌溉时,表层土壤首先接受水分输入,若下渗速率较慢,水分会滞留在表层,经过较长时间后,才能逐渐渗透到深层土壤^[21]。同时,溶解在水中的养分、污染物等溶质也随水分迁移,导致深层土壤中这些物质的含量变化滞后于表层^[22]。

在造林过程中,通过调控土壤化学性质(如提高SOC、调节 pH 等)可以有效改善土壤团聚体稳定性,从而增强土壤的抗侵蚀能力和碳固存潜力^[23-24]。这些

发现为深入理解土壤团聚体稳定性的调控机制提供了重要依据,同时也为造林过程中土壤管理策略的优化提供了科学参考。

4 结论

1)林龄增长促进了土壤团聚体的稳定性和结构的改善。林龄和土层共同调控土壤团聚体的形成与稳定性,上层土壤和林龄较长的区域团聚体稳定性更高。

2)随着森林生态系统的演替,土壤SOC质量分数显著上升,这与凋落物积累和根系活动密切相关。长期造林更有利于土壤有机碳的积累和保存。

3)化学因子在土壤团聚体稳定性中起主导作用,上层土壤的环境因子对团聚体稳定性的影响更为显著,可能与根系活动、有机质输入和微生物活性在表层土壤中更为活跃有关。深层土壤对化学因子的响应相对滞后。

未来的研究可以进一步探讨环境因子在不同生态系统和土壤类型中的具体作用机制,以期为全球气候变化背景下的土壤碳固存和生态系统稳定性提供更为全面的理论支持。

参 考 文 献

- [1] 刘亚龙,王萍,汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 627-643.
LIU Y L, WANG P, WANG J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 627-643.
- [2] SCHARLEMANN J P, TANNER E V, HIEDERER R, et al. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool [J]. Carbon Management, 2014, 5(1): 81-91.
- [3] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [4] 秦文宽,李晓杰,王旭东,等. 土壤溶解性有机碳对气候变暖的响应研究进展[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2024, 60(4): 758-766.
QIN W K, LI X J, WANG X D, et al. Responses of soil dissolved organic carbon to climate warming: A review [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2024, 60(4): 758-766.
- [5] 甘安琪,姜佳昌,李霞,等. 放牧强度对高寒草地土壤团聚体稳定性及有机碳含量影响[J]. 草地学报, 2024, 32(6): 1832-1842.
GAN A Q, JIANG J C, LI X, et al. Effects of grazing intensity on soil aggregate stability and its associated organic carbon content in alpine grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(6): 1832-1842.
- [6] 吴嘉俊,童文彬,江建锋,等. 水稻秸秆炭施用对水稻土团聚体稳定性及其碳氮分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(3): 457-468.
WU J J, TONG W B, JIANG J F, et al. Application of rice straw biochar increases soil aggregate stability and carbon and nitrogen distribution in paddy soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(3): 457-468.
- [7] 中国林业科学研究院林业研究所. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
RITF CAF. Forest soil analysis method [M]. Beijing: China Standard Press, 1999.
- [8] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water stable aggregates in soils [J]. European Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [9] 李娅丽,何国兴,柳小妮,等. 陇中黄土高原温性荒漠不同草地型土壤团聚体稳定性及有机碳分布特征[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5431-5440.
LI Y L, HE G X, LIU X N, et al. Distribution characteristics of soil aggregate stability and organic carbon of different grassland types in the temperate desert of Longzhong Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5431-5440.
- [10] 柯琴,赵隽宇,覃祚玉,等. 人工林土壤团聚体稳定性及影响因素[J]. 世界林业研究, 2024, 37(6): 33-39.
KE Q, ZHAO J Y, QIN Z Y, et al. Soil aggregates stability in plantations and its influencing factors [J]. World Forestry Research, 2024, 37(6): 33-39.
- [11] DUCHICELA J, VOGELSANG K M, SCHULTZ P A, et al. Non-native plants and soil microbes: Potential contributors to the consistent reduction in soil aggregate stability caused by the disturbance of North American grasslands [J]. New Phytologist, 2012, 196(1): 212-222.
- [12] LEI X, SHEN Y, ZHAO J, et al. Root exudates mediate the processes of soil organic carbon input and efflux [J]. Plants, 2023, 12(3): 630.
- [13] 乔鑫鑫,王艳芳,李乾云,等. 复种模式对豫西褐土团聚体稳定性及其碳、氮分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 380-391.
QIAO X X, WANG Y F, LI Q Y, et al. Effects of multi-cropping systems on cinnamon soil aggregate stability, carbon and nitrogen distribution in western Henan Province [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2021, 27(3): 380-391.
- [14] 张佛熠,蔡昌永明,钟嘉琳,等. 城市化对绿地土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响: 以江西省南昌市为

- 例[J]. 环境科学, 2024, 45(11): 6538–6545.
- ZANG F Y, CAI C Y M, ZHONG J L, et al. Impacts of urbanization on soil aggregate stability and organic carbon content in urban greenspaces: A case study of Nanchang City, Jiangxi Province [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(11): 6538–6545.
- [15] RUMPEL C, KÖGEL-KNABNER I. Deep soil organic matter—A key but poorly understood component of terrestrial C cycle [J]. *Plant and Soil*, 2011, 338 (1/2) , 143–158.
- [16] FENG J, HE K, ZHANG Q, et al. Changes in plant inputs alter soil carbon and microbial communities in forest ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(10): 3426–3440.
- [17] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 施用畜禽粪便和化肥对土壤活性有机碳库和团聚体稳定性影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 233–238.
- LI J T, ZHONG X L, ZHAO Q G. Soil active organic carbon pool and aggregate stability as affected by application of livestock and poultry excrement and chemical fertilizer [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (1): 233–238.
- [18] 秦崧悦, 吴新亮, 褚保森, 等. 贺兰山不同坡向和海拔梯度土壤团聚体组成和稳定性变化特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(17): 7770–7785.
- QIN S Y, WU X L, CHU B S, et al. Characteristics and influencing factors of soil aggregate composition and stability under different slope orientation and elevation gradients in Helan Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(17): 7770–7785.
- [19] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter [J]. *Nature*, 2015, 528(7580) , 60–68.
- [20] HALLEY J M, HARTLEY S, KALLIMANIS A S, et al. Uses and abuses of fractal methodology in ecology [J]. *Ecology Letters*, 2004, 7(3): 254–271.
- [21] BARDGETT R D, MOMMER L, DE VRIES F T. Going underground: Root traits as drivers of ecosystem processes [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29 (12) : 692–699.
- [22] GROH J, STUMPP C, LÜCKE A, et al. Inverse estimation of soil hydraulic and transport parameters of layered soils from water stable isotope and lysimeter data [J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1–19.
- [23] 张世祺, 王沛裴, 王昌全, 等. 不同植烟年限对土壤团聚体稳定性的影响及其相关因素分析[J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1229–1236.
- ZHANG S Q, WANG P P, WANG C Q, et al. Effects of different tobacco cropping years on soil aggregate stability and its influential factors [J]. *Soil*, 2017, 49(6): 1229–1236.
- [24] WANG S, LI T, ZHENG Z. Tea plantation age effects on soil aggregate-associated carbon and nitrogen in the hilly region of western Sichuan, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 180: 91–98.