

人工和天然油松林表层土壤不同粒径团聚体 有机碳及其组分分布特征

高利强¹, 刘莹^{1,2}, 王国梁^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要: 在全球天然林面积持续下降而人工林面积不断增加的背景下,人工林是否能达到天然林的土壤固碳能力尚不清楚。以黄土高原子午岭林区的成熟人工和天然油松林为研究对象,比较分析了不同密度人工林和天然林 0—20 cm 土层的土壤团聚体组成、不同粒径团聚体土壤有机碳(SOC)、不同活性 SOC 及球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)的分布特征和相关性。结果表明:(1)人工林表层土壤全土层的总 SOC 含量及其高活性、低活性、非活性 SOC 组分的含量均显著低于天然林,其中总 SOC 含量和非活性 SOC 含量随林分密度增加而增加,低活性 SOC 含量反之。(2)人工林表层土壤各粒径团聚体的总 SOC 含量及其组分含量均显著低于天然林。人工林大团聚体的重量百分含量、总 SOC 含量及非活性 SOC 含量随林分密度的增加而增加,但均显著低于天然林。(3)人工林表层土壤的 SOC 含量随林分密度增加而增加,其峰值 17.95 g/kg,为天然林 SOC 含量的 65.5%,其中大团聚体的数量及其 SOC 含量和稳定性的显著降低是导致两者差异的主要原因。活性 SOC 百分含量与总 SOC 含量的增加呈负相关关系,GRSP 随林分密度增加而增加,但低于天然林,且通过提高大团聚体数量增加总 SOC 含量。增加人工林林分密度可以增加其表层土壤的生物量、土壤大团聚体数量、GRSP 含量,以及降低活性 SOC 百分含量,进而提高其土壤固碳能力,同时显著降低其植物多样性。

关键词: 人工林与天然林; 土壤碳汇; 不同粒径团聚体有机碳; 不同活性有机碳; 球囊霉素相关土壤蛋白
中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)02-0320-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.02.037

Distribution Characteristics of Organic Carbon and Its Components of Different Particle Size Aggregates in Planted and Natural *Pinus tabulaeformis* Forests

GAO Liqiang¹, LIU Ying^{1,2}, WANG Guoliang^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: It is unclear whether the soil carbon sequestration capacity of plantation forests can reach the level of natural forests, especially under the declining area of natural forests and increasing the area of plantation forests on a global scale. Taking planted and natural *Pinus tabulaeformis* forests in the Ziwuling Forest Region of Loess Plateau as the research object, the distribution characteristics and correlations of soil aggregate composition, soil organic carbon (SOC), different degrees of labile SOC and Glomalin-related soil protein (GRSP) in 0—20 cm soil layer of different density plantations and natural forests were compared and analyzed. The results showed that: (1) The total SOC content and the content of its composition: very-labile, less-labile, and non-labile SOC in the whole soil of the plantations were significantly lower than those in the natural forests. The total SOC and non-labile SOC contents increased with increasing stand density, while the less-labile SOC content was the opposite. (2) The total SOC and its component contents of each particle size aggregates in the plantations were significantly lower than those in the natural forests. With increasing stand density, the weight percentage of macroaggregates, total SOC content and non-labile SOC content of macroaggregates of plantation forests increased, but were significantly lower than those of natural forests. (3) The SOC content of the plantations increased with the increase of stand density, and its peak value was 17.95 g/kg, which was 65.5% of the

收稿日期: 2022-09-01

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42007062); 国家自然科学基金项目(42130717); 中央高效基本科研业务费项目(2452020052)

第一作者: 高利强(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: liqianggao@nwfufu.edu.cn

通信作者: 王国梁(1971—), 男, 博士生导师, 主要从事恢复生态学和水土保持研究。E-mail: glwang@nwsuaf.edu.cn

SOC content of the natural forests. Among them, the number of macroaggregates and their SOC content was significantly reduced, which was the main reason for the difference. The percentage of labile SOC was negatively correlated with the increase of total SOC content, GRSP increased with the increase of stand density but was lower than that of natural forest, and the total SOC content was increased by increasing the number of macroaggregates. Increasing the plantation stand density can improve its soil carbon sequestration capacity by increasing surface soil biomass, the number of soil macroaggregates, and the GRSP content, and reducing the percentage of labile SOC, but significantly reduces the plant diversity of the plantations.

Keywords: plantations and natural forests; soil carbon sequestration; organic carbon of different particle size aggregates; different labile organic carbons; glomalin-related soil protein

随着人们对森林生态系统碳汇功能认识的不断深化,各地都大力营造人工林,其面积迅速增加^[1]。然而,人工林生态系统林分结构简单,生物多样性降低,抗逆性差,生态服务功能不断退化^[2-3]。近年来,有学者^[4-6]提出人工林近自然改造理念,主张通过增加人工林生态系统土壤有机碳含量(SOC)和提高土壤团聚体稳定性来提升人工林生态系统的碳汇功能和水土保持功能。

前期研究^[7]表明,土壤团聚体是有机碳的主要存在场所,其对有机碳的物理保护作用是土壤碳固定的主要机制。而有机碳作为土壤团粒的胶结物质,又有助于团聚体的形成及稳定性的加强^[8]。因此,土壤团聚体的稳定性和分布特征对SOC的积累具有重要影响。在不同恢复阶段,邸涵悦等^[9]发现,乔木阶段相较于灌草阶段,土壤中的球囊霉素相关蛋白(GRSP)和SOC的累积显著加强;李文杰等^[10]发现,人工刺槐林生态系统随恢复年限的增加逐渐稳定,并对土壤的碳汇具有积极的正效应;景航等^[11]的研究发现,幼林地团聚体稳定性和易提取GRSP显著降低,灌木地及撂荒地团聚体稳定性和易提取GRSP显著增加;王文静等^[12]通过研究不同林分土壤有机碳储量发现,阔叶林碳储量高于针叶林,混交林碳储量高于纯林。然而,上述研究均单独从天然林或人工林角度阐述植被不同恢复阶段、恢复年限、植被类型以及不同林分的土壤有机碳储量和团聚体稳定性变化特征,人工林和天然林不同粒径团聚体SOC含量的差异特征以及不同活性SOC是否对其产生影响却少见研究。人工林在间伐等管理措施下土壤碳汇功能是否得到提升,哪种林分密度最有利于土壤碳汇及其与天然林存在多大差距仍不明确。球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)作为土壤丛枝菌根真菌(FAM)的分泌物,近期被报道^[13-14]不仅具有胶结土壤颗粒形成团粒结构的作用,还可以提高团聚体稳定性以减少有机质的分解,从而提高SOC的积累,在森林生态系统的碳循环过程中发挥重要作用。GRSP是否为人工林和天然林生态系统土壤有机碳含量和稳定性的影响因素

及其影响路径和机理也不明确。

本研究以不同密度的人工和天然油松林为研究对象,通过对比研究不同人工林和天然林土壤团聚体组成、不同粒径团聚体SOC、不同活性SOC以及GRSP的分布特征,旨在阐明人工林和天然林在植被恢复过程中的有机碳分布特征及其主要影响因素和影响机理,以期改进人工林管理策略从而提高其碳汇功能提供参考依据,对人工林碳储量的增加和近自然经营具有重要的科学意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在黄土高原子午岭林区开展并完成。试验样地分为2处,天然油松林位于甘肃省正宁县中湾林场(35°17'—35°27'N, 108°27'—108°35'E),林龄为56年,林地自然生长,无强烈干扰;不同密度的人工油松林位于陕西省黄龙县蔡家川林场(35°42'—35°49'N, 108°57'—109°54'E),两地气候条件与立地条件相似。研究区属于温带大陆季风气候,平均海拔1 165~1 533 m,年平均气温9℃,年平均降水量588 mm,年平均光照时间2 369.8 h。研究区土壤属于石灰性褐色森林土,优势种群为油松(*Pinus tabulaeformis*)和辽东栎(*Quercus liaotungensis*)。

1.2 试验设计

研究区内人工油松林营造于1962年,初值密度为3 300株/hm²。1985年,林场为提高优质木材产出量,培育目标林木和保留生态目标树,对部分林地进行3种强度(强度、中度和轻度)的间伐试验。最终对应的保留密度分别为800(低密度),1 500(中密度),2 200(高密度)株/hm²。通过实地调查,选择研究区内典型的成熟天然油松林作为研究对象,其林分密度约为1 500株/hm²,林地主要伴生树种有辽东栎、山里红(*Crataegus pinnatifida*)和西北荀子(*Cotoneaster zebellii*)等。每个样地各设置3个20 m×20 m的样方,共计12个样方,每个样方之间的距离>30 m。样品采集于2019年8月进行,室内分析试验于2019年9月开始。样地基本情况见表1。

表 1 样地基本特征

指标	人工林			天然林
	低密度	中密度	高密度	
保留密度/(株·hm ⁻²)	781±33b	1450±27c	2181±11a	1405±35c
郁闭度/%	72.8±1.3c	81.5±0.7b	90.3±0.9a	75.0±2.6c
胸径/cm	24.2±0.4a	21.9±0.6b	17.2±0.3d	19.5±0.8c
树高/m	14.1±0.1a	12.3±0.1b	12.9±0.1c	9.7±0.3d
灌木盖度/%	65.8±3.8a	51.3±3.6b	11.4±1.9c	63.1±3.5a
草本盖度/%	25.4±1.4a	18.6±2.2b	13.5±1.3c	28.5±2.8a
凋落物厚度/cm	5.8±0.1c	7.0±0.1b	7.8±0.1b	9.0±0.9a
样地其他重要乔木	辽东栎 (<i>Quercus liaotungensis</i>)、胡桃楸 (<i>Juglans mandshurica</i>)	辽东栎、山里红 (<i>Crataegus pinnatifida</i>)	辽东栎	辽东栎、山里红
样地主要灌木	红瑞木 (<i>Swida alba</i>)、金银忍冬 (<i>Lonicera maackii</i>)、土庄绣线菊 (<i>Spiraea pubescens</i>)	金银忍冬、土庄绣线菊、蛇葡萄 (<i>Ampelopsis glandulosa</i>)	金银忍冬、陕西荚蒾 (<i>Viburnum schensianum</i>)、悬钩子 (<i>Rubus corchorifolius</i>)	西北荀子 (<i>Cotoneaster zebedei</i>)、红瑞木、栎树 (<i>Koeleria paniculata</i>)
样地主要草本	披针苔草 (<i>Carex lanceolata</i>)、大火草 (<i>Anemone tomentosa</i>)、异叶败酱 (<i>Patrinia heterophylla</i>)	披针苔草、铁杆蒿 (<i>Artemisia sacrorum</i>)、异叶败酱	披针苔草、早开堇菜 (<i>Viola prionantha</i>)、铁杆蒿	披针苔草、大油芒 (<i>Spodiopogon sibiricus</i>)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i>)

注:表中数值为平均值±标准差;n=3;不同小写字母表示不同处理间差异显著(p<0.05)。下同。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集 去除表面的凋落物层,用直径 5 cm 的土钻对 0—20 cm 土壤进行采集取样,每个样方内随机选取 10 个点,将 10 个土样混合均匀,然后去除土壤中的凋落物及砾石,待自然风干后进行土壤理化性质的测定。

1.3.2 乔灌木及凋落物生物量测定 乔木:对每个样方内的乔木进行每木检尺,单株油松生物量采用马钦彦^[15]在该地区建立的油松生物量方程估算;灌木:在每个样地内随机设置 3 个 2 m×2 m 灌木样方和 3 个 1 m×1 m 草本样方,调查灌木种类、株数、高度、盖度后,按照高度选取标准株,将其地上、地下部分全部挖出,现场称取鲜重后带回实验;凋落物:在每个样地内随机选取 3 个 20 cm×20 cm 样方,将样方内枯落物全部收获后带回实验室。将上述采集的灌木样品和枯落物置于 85 °C 烘箱烘干至恒重,测定其含水率,计算生物量。

1.3.3 土壤团聚体稳定性测定 团聚体稳定性采用重量平均直径(MWD)和几何平均直径(GWD)来衡量^[16],其值越大,说明土壤结构越好,土壤团聚体稳定性越好^[17-18]。采用干筛法(干筛机型号为 8411)将原状土分为 4 个粒径,依次为大团聚体>2 mm,中团聚体 0.25~2 mm,微团聚体 0.053~0.25 mm,粉黏团聚体<0.053 mm^[19],并对每个粒径的样品称重,用以计算 MWD 和 GMD。公式为:

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

$$GMD = e^{\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}} \quad (2)$$

式中: x_i 为第*i*级的团聚体平均直径(mm); ω_i 为第*i*级的团聚体的干重(g);*n*为团聚体的径级数。

1.3.4 总 SOC 和不同活性 SOC 测定 总 SOC 含量采用 H₂SO₄—K₂Cr₂O₇氧化容量法进行测定^[20]。不同活性 SOC 含量采用高锰酸钾氧化法测定,分别使用 33,333 mmol/L 浓度的高锰酸钾测定土壤团聚体的高活性和活性 SOC^[21]。其中,活性与高活性 SOC 测定值之差为低活性 SOC 含量,总 SOC 与活性 SOC 之差为非活性 SOC 含量。

1.3.5 团聚体球囊霉素相关土壤蛋白 球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)通过改进后的考马斯亮蓝法进行测定^[22]。总球囊霉素(T—GRSP)含量的测定方法为:称取 1 g 风干土置于 10 mL 离心管中,加入 8 mL 50 mmol/L 柠檬酸钠缓冲液后在 121 °C 下浸提 60 min,立即在 10 000 r/min 下离心 5 min 后移走上清液,连续浸提 3 次直至上清液无色或淡黄色为止,合并多次离心后的上清液于 50 mL 容量瓶中暂存。用移液管取上述浸提液 1 mL 置于 10 mL 试管中,加入 5 mL 考马斯亮蓝,显色 2 min 后在紫外分光光度计 595 nm 波长下比色。易提取球囊霉素(EE—GRSP)含量的测定方法为:称取 1 g 风干土置于 10 mL 离心管中,加入 8 mL 20 mmol/L 柠檬酸钠缓冲液后在 121 °C 下浸提 30 min,其余步骤与 T—GRSP 测定方法一致。

1.4 数据分析

使用 SPSS 26 One-way ANOVA 分析检验不同

处理间以及不同粒径团聚体间的差异显著性。采用相关性分析法分析土壤有机碳含量与其影响因素之间的相关性;采用 Origin 2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 人工林与天然林生物量及植物多样性比较

从表 2 可以看出,与天然林相比,人工林乔木和草本地上生物量以及总生物量较高,而灌木地上部

分、乔木根系、灌草根系和总根系生物量以及凋落物生物量均显著降低($p < 0.05$)。

随着人工林密度的增加,乔木地上和地下部分、草本、凋落物生物量、总根系生物量以及总生物量均显著增加,灌木生物量则显著降低,其中凋落物生物量和总根系生物量峰值分别约为天然林的 54.4%和 95.1%($p < 0.05$)。

表 2 人工林与天然林生物量对比

单位: t/hm²

项目	人工林			天然林
	低密度	中密度	高密度	
乔木地上部分	164.21±5.01c	228.80±5.84a	237.50±7.87a	191.08±4.40b
乔木根系	47.05±2.00c	66.07±2.17b	68.80±3.21b	71.91±1.24a
灌木地上部分	1.25±0.09b	1.17±0.10b	0.10±0.02c	3.13±0.14a
草本地上部分	0.91±0.07b	0.97±0.07b	1.74±0.12a	0.82±0.04b
灌草根系	0.82±0.14b	0.84±0.16b	0.81±0.09b	1.25±0.12a
凋落物	7.04±0.14d	9.60±0.17c	12.37±0.24b	22.73±0.40a
总根系	47.87±2.14c	66.91±2.33b	69.61±3.30b	73.16±1.36a
总生物量	221.28±10.21b	307.45±15.35a	321.32±17.28a	290.92±9.61a

从表 3 可以看出,与天然林相比,低密度人工林乔木层、灌木层、草本层的植物多样性程度均最高($p < 0.05$),而随着人工林密度的增加,各层的植物多样性程度均显著降低($p < 0.05$)。

表 3 人工林和天然林中植物多样性指数

Simpson 指数	人工林			天然林
	低密度	中密度	高密度	
乔木层	0.59±0.02a	0.45±0.03b	0.31±0.03c	0.40±0.02b
灌木层	0.86±0.02a	0.83±0.02a	0.72±0.02c	0.78±0.01b
草本层	0.84±0.02a	0.81±0.01a	0.56±0.04b	0.50±0.01b

2.2 人工林与天然林土壤团聚体组成及稳定性比较

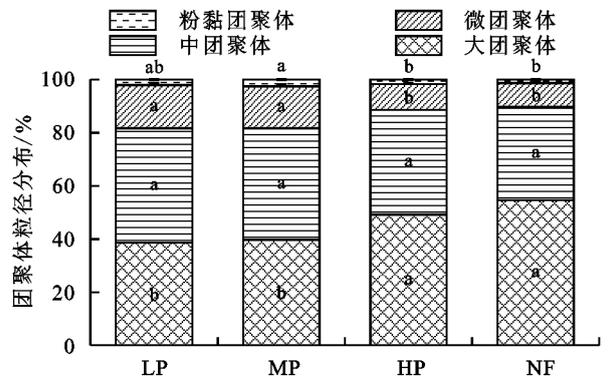
油松林土壤以大团聚体和中团聚体为主,两者约占比 85.5%。与天然林相比,高密度人工林团聚体粒径分布无显著变化,低、中密度人工林土壤中大团聚体占比为 39.2%,显著低于天然林的 54.6%,而微团聚体和粉黏团聚体占比为 18.3%,显著高于天然林的 10.1%($p < 0.05$)(图 1)。随人工林密度的增加,土壤中大团聚体占比显著增加而微团聚体和粉黏团聚体占比显著减少($p < 0.05$)(图 1)。这与在中国西北地区关于植被恢复后大团聚体数量显著上升的研究成果^[23-24]相一致(图 1)。而不同处理下中团聚体数量无显著变化($p > 0.05$)。

从图 2 可以看出,与天然林相比,高密度人工林土壤团聚体的 MWD 和 GWD 无显著变化,低、中密度人工林的 MWD 和 GWD 分别显著降低 22.5%和 33.1%($p < 0.05$)。随人工林密度的增加,表层土壤团聚体的 MWD 和 GWD 均显著增加($p < 0.05$)。

2.3 人工林与天然林全土及不同粒径团聚体有机碳含量比较

从图 3 可以看出,与天然林相比,人工林全土及

不同粒径土壤团聚体的 SOC 含量均显著降低,其中全土、大团聚体、中团聚体 SOC 含量均值分别为天然林的 55.4%,69.2%和 58.1%($p < 0.05$)。随人工林密度的增加,全土以及大团聚体和中团聚体的 SOC 含量均显著增加,其中全土 SOC 含量峰值为 17.95 g/kg,为天然林的 65.5%,而微团聚体和粉黏团聚体的 SOC 含量并未发生显著变化($p < 0.05$)。



注:LP、MP、HP 分别为低、中、高密度的人工林,NF 为天然林; $n=5$;不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同处理间土壤团聚体分布特征

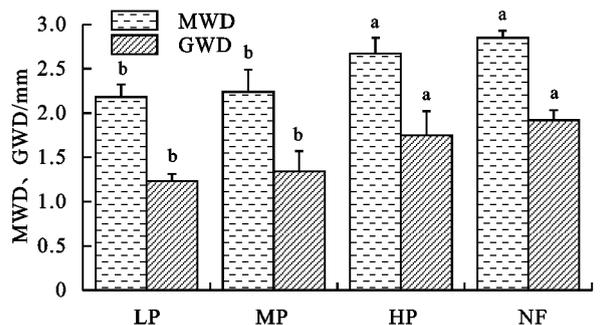


图 2 人工林与天然林土壤团聚体的平均重量直径和几何平均直径

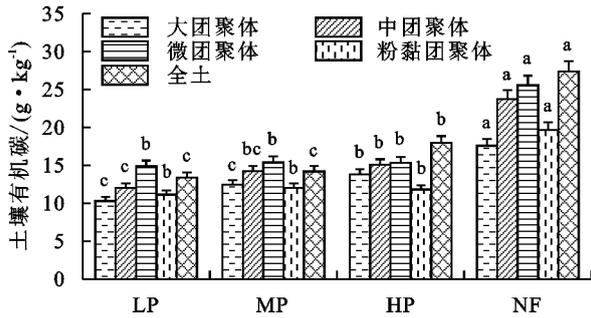


图 3 人工林与天然林不同粒径土壤团聚体有机碳含量

2.4 人工林与天然林全土及不同粒径团聚体不同活性有机碳含量比较

人工林全土及不同粒径土壤团聚体的高活性、低活性、非活性 SOC 含量均显著低于天然林,其中全土和大团聚体的低活性 SOC 含量随林分密度增加而显

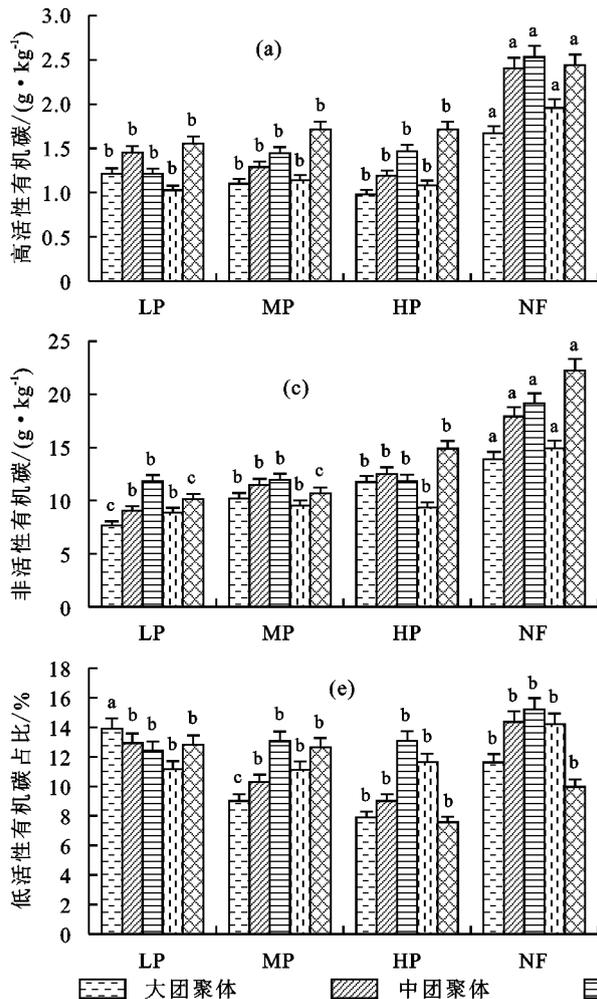
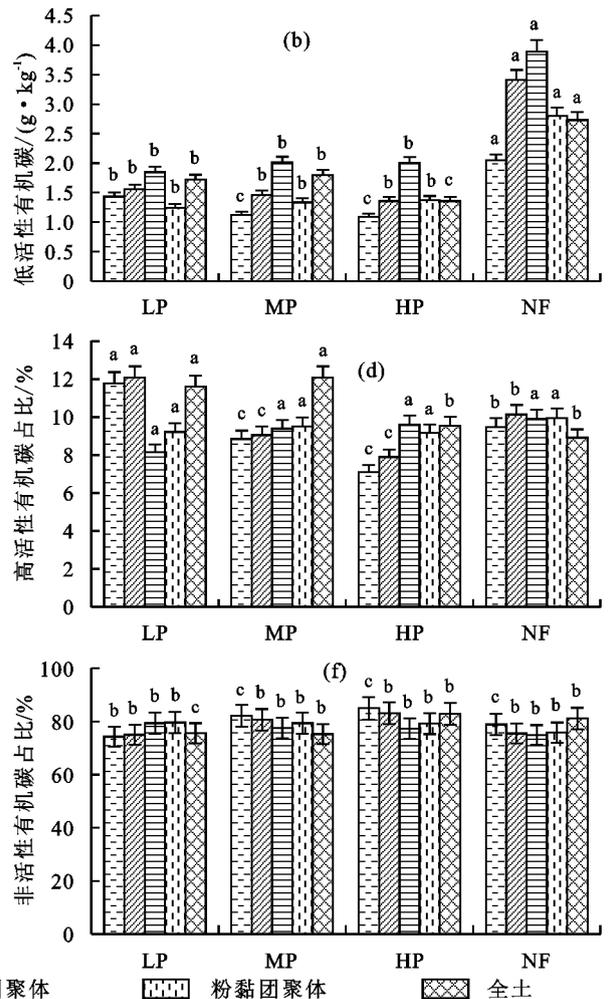


图 4 人工林和天然林不同活性土壤有机碳含量

2.5 人工林与天然林不同粒径团聚体 GRSP 含量比较

人工油松林土壤的 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量分别为 0.58~0.93, 1.68~2.84 g/kg; 天然油松林土壤的 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量分别为 0.76~0.93, 2.47~3.34 g/kg(图 5)。与天然林相比,低、中密度人工林土壤的 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量均显著降低,高密度 EE-GRSP 无显著差异, T-GRSP 显著降低($p < 0.05$)

著降低,全土和大团聚体的非活性 SOC 含量随林分密度增加而显著增加($p < 0.05$)(图 4a~图 4c)。人工林全土、大团聚体和中团聚体的高活性 SOC 占总 SOC 的百分数显著高于天然林,且随林分密度的增加而显著降低;人工林全土和大团聚体的低活性 SOC 占总 SOC 的百分数显著高于天然林,且随林分密度的增加而显著降低;人工林全土和大团聚体的非活性 SOC 占总 SOC 的百分数均显著低于天然林,且随林分密度的增加而显著增加($p < 0.05$)(图 4d~图 4f)。此外, SOC 和活性 SOC 含量按团聚体粒径从大到小均呈先增后减的趋势,且均在微团聚体(0.053~0.25 mm)粒径下达到峰值(图 3、图 4),这可能是因为土壤粒径减小,其比表面积成倍增加^[25],而增加的比表面积黏结更多的根系分泌物和有机质,从而使 SOC 含量在该粒径下增加。



(图 5)。随人工林密度的增加,全土 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量均在高林分密度下显著增加,而不同粒径团聚体 GRSP 含量无显著差异($p < 0.05$)(图 5)。

2.6 土壤有机碳和团聚体稳定性与 GRSP、根系生物量及凋落物生物量的相关性

由表 4 可知, T-GRSP 与全土及不同粒径团聚体 SOC 含量均呈极显著正相关关系,微团聚体中的

T-GRSP 与 SOC 含量呈显著正相关关系。EE-GRSP 与全土 SOC 含量呈极显著正相关关系,但相关系数较 T-GRSP 低,与不同粒径团聚体 SOC 含量呈显著正相关关系。T-GRSP 和 EE-GRSP 均与团聚体稳定性参数呈显著正相关关系,其中 EE-

GRSP 呈极显著正相关关系且相关系数更高。此外,根系生物量和凋落物生物量与 T-GRSP 和 EE-GRSP 含量呈显著正相关关系,同时也与全土及不同粒径团聚体 SOC 含量和团聚体稳定性参数均呈极显著正相关关系。

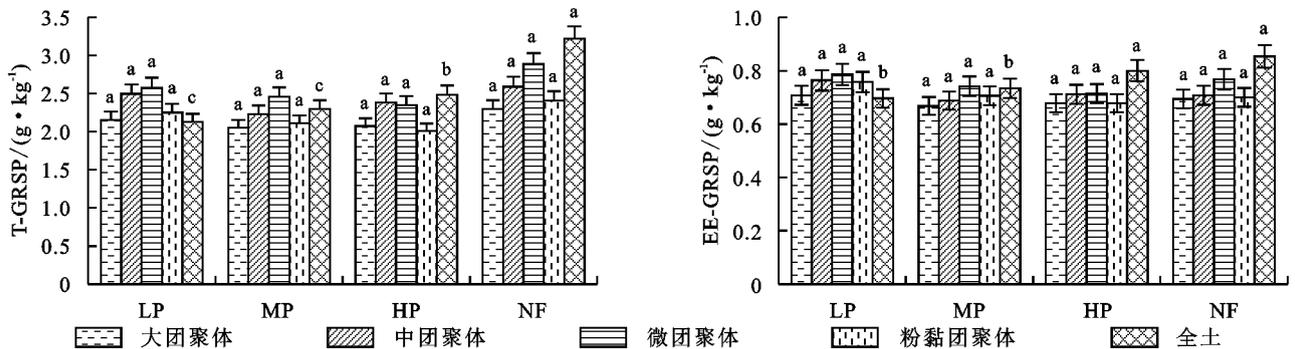


图 5 人工和天然林不同粒径团聚体易提取球囊霉素及总球囊霉素含量

表 4 土壤有机碳和团聚体稳定性与 GRSP、根系生物量及凋落物生物量的相关性

项目	团聚体	SOC	大团聚体 SOC	中团聚体 SOC	微团聚体 SOC	粉黏团聚体 SOC	MWD	GWD	根系 生物量	凋落物 生物量
高活性有机碳		0.839 **	0.606 **	0.700 **	0.721 **	0.698 **	0.569 **	0.573 **	0.580 **	0.915 **
低活性有机碳		0.779 **	0.500 *	0.607 **	0.645 **	0.585 **	0.478 *	0.483 *	0.397	0.793 **
非活性有机碳		0.924 **	0.781 **	0.837 **	0.836 **	0.767 **	0.649 **	0.658 **	0.614 **	0.878 **
	全土	0.871 **	0.790 **	0.836 **	0.810 **	0.794 **	0.489 *	0.532 *	0.608 **	0.877 **
T-GRSP	大团聚体	0.335	0.373	0.426	0.460 *	0.531 *	0.194	0.238	0.185	0.297
	中团聚体	0.327	0.447 *	0.469 *	0.484 *	0.573 **	0.232	0.288	0.075	0.248
	微团聚体	0.445 *	0.452 *	0.481 *	0.514 *	0.528 *	0.234	0.307	0.231	0.333
	粉黏团聚体	0.375	0.430	0.469 *	0.499 *	0.557 *	0.102	0.193	0.161	0.275
	全土	0.582 **	0.506 *	0.515 *	0.445 *	0.449 *	0.650 **	0.630 **	0.552 *	0.611 **
EE-GRSP	大团聚体	0.127	0.047	-0.021	-0.037	0.023	0.082	0.078	0.025	0.044
	中团聚体	0.024	-0.003	-0.102	-0.130	-0.087	-0.022	-0.053	-0.078	-0.068
	微团聚体	0.124	0.089	-0.027	-0.065	-0.085	-0.082	-0.104	-0.016	0.036
	粉黏团聚体	0.009	0.044	-0.091	-0.142	-0.127	-0.124	-0.137	-0.135	-0.116
根系生物量		0.597 **	0.649 **	0.649 **	0.510 *	0.547 *	0.552 *	0.556 *	1.000	0.711 **
凋落物生物量		0.953 **	0.769 **	0.827 **	0.799 **	0.751 **	0.624 **	0.638 **	0.711 **	1.000
MWD		0.569 **	0.434	0.477 *	0.401	0.375	1.000	0.968 **	0.530 *	0.624 **
GWD		0.587 **	0.465 *	0.533 *	0.476 *	0.446 *	0.968 **	1.000	0.521 *	0.638 **

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

3 讨论

3.1 人工林与天然林有机碳及不同活性有机碳差异特征及原因

本研究发现,人工油松林全土和各粒径土壤团聚体的 SOC 含量均显著低于天然林,并且全土和大团聚体的 SOC 含量随林分密度的增加而增加,其中全土 SOC 含量均值仅为天然林的 55.4%(图 3),Liao 等^[26]关于人工林生态系统碳储量相较于天然林减少 28%的研究结果也证明这一点。本研究进一步认为,人工林和天然林 SOC 含量差异的主要原因是人工林中土壤大团聚体的数量及其 SOC 含量和稳定性均

显著低于天然林,该结论由 3 点结果支持:(1)图 1 中低密度和中密度人工林土壤大团聚体数量占比为 39.2%,显著低于天然林的 54.6%,表明土壤大团聚体的数量可以显著影响 SOC 含量;(2)图 3 中人工林土壤大团聚体 SOC 含量显著低于天然林,其 SOC 含量均值仅为天然林的 69.2%,同时这与 Qiu 等^[27]的研究结果相似,其研究发现大团聚体有机碳储量的下降是由于大团聚体和大团聚体有机碳浓度下降所导致;(3)图 2 表明较低密度人工林的土壤团聚体稳定性显著低于天然林。

本研究还发现,人工林全土和大团聚体的活性

SOC、高活性 SOC 占总 SOC 的百分数均显著高于天然林,且随林分密度的增加而显著降低,非活性 SOC 占总 SOC 的百分数均低于天然林,且随林分密度的增加而显著增加(图 4)。这说明土壤有机碳储量的来源主要是非活性 SOC,且依赖于大团聚体,土壤中活性较高的 SOC 比例越小,越有利于 SOC 的积累。首先,这是因为活性 SOC 作为土壤有机质的活性部分,容易被土壤微生物分解矿化和植物吸收利用,当有机质进入到土壤中后,其活性部分很快被分解消耗,而非活性部分由于分解慢被逐渐积累下来,因此当有机质中活性较低的 SOC 比例越高时,土壤有机碳的积累量越多,越有利于 SOC 储量的增加;其次,在确定的一组气候、土壤和植被类型下,土壤微生物的分解能力可能存在一定阈值。由于天然林和高密度林分的生物量总体上较高(表 2),当其输入的有机质超出微生物分解能力时,超出部分便积累下来成为土壤有机碳;另外,土壤团聚体对有机碳的物理保护作用被认为是碳固定的主要机制^[7],同时有机质又是土壤团聚体的胶结物质,当非活性 SOC 充当团聚体的胶结物质时,团聚体不易被微生物分散,因此保留下来的团聚体及非活性 SOC 便成为有机碳积累的主要来源。

3.2 GRSP、根系生物量及凋落物生物量对人工林和天然林有机碳分布的影响

GRSP 具有极强的黏性,能黏结细小土壤颗粒形成稳定大团聚体,其对增加土壤碳库做出的贡献远超出土壤中活性微生物的贡献^[14]。本研究发现,人工林全土的 T—GRSP 和 EE—GRSP 含量均低于天然林(图 5),同时相关性分析表明,两者与全土和不同粒径团聚体 SOC 含量及团聚体稳定性参数均呈显著正相关关系(表 4),这说明 T—GRSP 和 EE—GRSP 均可以促进全土 SOC 的积累,这与孙利鹏^[28]关于在植被恢复过程中 GRSP 可以有效增强土壤固碳作用的研究结果一致。相关性分析也表明,T—GRSP 与全土 SOC 含量的正相关性(0.871**)更强,而 EE—GRSP 与团聚体稳定性参数的正相关性(0.650**)更强(表 4),团聚体稳定性参数的值越大,则表示大粒径团聚体含量越高^[17],这说明 GRSP 除作为 SOC 的组成部分增加团聚体有机碳含量之外,其 EE—GRSP 主要通过提高团聚体稳定性间接使大团聚体数量增加,从而共同促进 SOC 的积累。这与已有的关于 GRSP 作用的研究^[29-31]结果相符合,其认为 GRSP 不仅能将较小的土壤颗粒黏聚成稳定的团粒结构,并增强其稳定性,而且在土壤碳固定及循环过程中起着重要作用。本研究发现,微团聚体中 T—

GRSP 与 SOC 含量呈显著正相关关系,同时从图 5 也发现,T—GRSP 含量均在微团聚体(0.053~0.25 mm)粒径下达到峰值,说明微团聚体中 T—GRSP 可以用来表征土壤碳库的变化。

本研究还发现,根系生物量和凋落物生物量与 SOC 含量的变化趋势一致(表 2、图 3)。相关性分析表明两者与全土 SOC 含量呈极显著相关关系,同时也与 T—GRSP 和 EE—GRSP 呈显著正相关关系(表 4)。考虑到文中 GRSP 与 SOC 含量的关系,说明根系生物量和凋落物生物量对 SOC 积累的影响作用^[32]可能是通过影响 GRSP 含量来间接实现的。这是因为虽然植被的根系周转和枯枝落叶是土壤有机质的主要输入来源,但植被根系产生的 GRSP 对有机碳的固存作用对 SOC 积累更为重要^[14]。

综上分析人工林与天然林 SOC 分布差异的原因,本研究认为主要是天然林的凋落物输入量和根系生物量均较高,其中发达的植被根系又提高 GRSP 的含量,而 GRSP 作为土壤团聚体的胶结物质,不仅促进团聚体和大团聚体的形成,还增强其稳定性。在这种作用下,天然林的大团聚体数量及其固存的有机碳含量显著增加,进而增加总 SOC 含量。在不同密度人工林中,高密度人工林大团聚体的数量及其 SOC 含量、GRSP 含量均高于低密度人工林,因此其总 SOC 含量也较高。天然林和高密度人工林内活性较低的 SOC 百分含量高,其由于分解慢被保存下来,也增加总 SOC 的积累。

以往的研究^[33-36]表明,樟子松、油松、侧柏等乔木林地中土壤有机碳含量均在 0—10 cm 土层最高,且随土层深度的增加而降低。因此,本研究针对 0—20 cm 土层发现,人工林 SOC 含量随林分密度增加而增加,并阐明其机制,说明人工林土壤固碳能力仍有很大的提升空间;另一方面,与已有研究对比发现不同林分密度间有机碳含量的高低则会受树种的影响,如王岩松等^[35]的研究表明,不同林分密度的油松林的 SOC 含量表现为高密度油松林>中密度油松林>低密度油松林,与本研究结果一致。然而其他研究^[35-36]也表明,不同林分密度的刺槐和樟子松的 SOC 含量分别表现为低密度林分最高和中密度林分最高。本研究还发现,人工林植物多样性显著高于天然林,且低密度林分的植物多样性程度最高(表 2),与 SOC 含量的变化特征相反(图 3)。林分密度调控改变林隙大小,对林下光照、土壤养分、水分等环境因子均有影响^[37]。由于密度林分的降低,林内的种间竞争和资源竞争减弱,有利于单株林木的生长和林下灌草所

需资源的供给,从而在低密度林分下植物多样性程度更高^[38]。同时,局地环境的差异也影响凋落物的分解和 SOC 的积累。金虎范^[39]的研究表明,华北落叶松随密度的减小,其 C/N 和木质素/N 发生改变,从而促进其凋落物的分解。张恒宇等^[40]的研究发现,土壤含水量在低密度林地最高,而水分也有利于凋落物的分解。随着低密度林分植物多样性的增加,不同植被的针阔凋落叶也可以相互促进其分解速率。张晓曦等^[41]和李茜等^[42]的研究表明,油松凋落叶与阔叶凋落叶混合后对其分解速率产生加性效应,其中油松凋落叶分解受到显著促进。本研究中这些微环境因子可能影响凋落物的分解过程,从而在低密度林分下 SOC 的含量较低。

4 结论

(1)人工油松林生物量随林分密度增加而升高,植物多样性指数反之。天然油松林生物量介于低、中密度人工林之间,植物多样性指数介于中、高密度人工林之间。植物多样性变化趋势与 SOC 含量相反。

(2)人工油松林表层土壤全土和各粒径团聚体的 SOC 含量以及大团聚体数量均低于天然林,其全土 SOC 含量均值为 15.18 g/kg,约为天然林 SOC 含量(27.39 g/kg)的 55.4%。随人工林密度的增加,全土和大团聚体的 SOC 含量以及大团聚体数量均显著增加,说明土壤大团聚体的数量及其 SOC 含量的显著增加是导致总 SOC 含量增加的主要原因。

(3)人工林表层土壤全土和大团聚体的活性 SOC 占总 SOC 的百分数均显著高于天然林,且随林分密度的增加而显著降低,而非活性 SOC 占总 SOC 的百分数均低于天然林,且随林分密度的增加而显著增加,说明土壤有机碳储量的来源主要是非活性 SOC,且依赖于大团聚体,而且土壤中活性 SOC 的百分含量越小越有利于 SOC 的积累。

(4)人工林表层土壤 GRSP 含量以及根系和凋落物生物量均随密度增加而增加,且均小于天然林,同时均与全土和不同粒径团聚体的 SOC 含量以及团聚体稳定性参数呈显著正相关关系,说明 GRSP、根系生物量和凋落物生物量都是促进 SOC 积累的因素。其中 EE—GRSP 侧重于通过提高团聚体稳定性间接使大团聚体数量增加,从而促进 SOC 积累;微团聚体 T—GRSP 可以用来表征土壤碳库的变化。

(5)人工林密度调控可以显著促进其 SOC 的积累,并使其向着天然林的方向发展。从土壤碳增汇的角度来看,高密度人工林更有利于 SOC 的积累,其峰值 SOC 含量为 17.95 g/kg,约为天然林的 65.5%,说

明人工林表层土壤土壤固碳能力仍有很大提升空间。因此,在人工林管理过程中,适宜增加人工林的林分密度是人工林近自然改造的一个重要途径,但过高的林分密度可能降低人工林植物多样性,需要在密度调控过程中进行综合权衡。

参考文献:

- [1] FAO. Global forest resources assessment 2020: Main report [M]. Rome: FAO, 2020.
- [2] 刘庆,尹华军,程新颖,等.中国人工林生态系统的可持续更新问题与对策[J].世界林业研究,2010,23(1):71-75.
- [3] 刘世荣,杨予静,王晖.中国人工林经营发展战略与对策:从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J].生态学报,2018,38(1):1-10.
- [4] 陆元昌,张守攻,雷相东,等.人工林近自然化改造的理论基础和实施技术[J].世界林业研究,2009,22(1):20-27.
- [5] 黄凯璇,汤新艺,秦欢,等.近自然经营对杉木人工林地被物和土壤碳氮积累的影响[J].生态环境学报,2020,29(8):1556-1565.
- [6] 孟祥江,何邦亮,马正锐,等.我国马尾松林经营现状及近自然育林探索[J].世界林业研究,2018,31(3):63-67.
- [7] 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.
- [8] 窦森,李凯,关松.土壤团聚体中有机质研究进展[J].土壤学报,2011,48(2):412-418.
- [9] 邸涵悦,郝好鑫,孙兆祥,等.不同演替阶段下球囊霉素相关土壤蛋白对团聚体稳定性的影响[J].生态环境学报,2021,30(4):718-725.
- [10] 李文杰,张祯皎,赵雅萍,等.刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系[J].环境科学,2022,43(2):1050-1058.
- [11] 景航,史君怡,王国梁,等.皆伐油松林不同恢复措施下团聚体与球囊霉素分布特征[J].中国环境科学,2017,37(8):3056-3063.
- [12] 王文静,王百田,吕钊,等.山西太岳山不同林分土壤有机碳储量研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(1):81-85.
- [13] 彭思利,申鸿,郭涛.接种丛枝菌根真菌对土壤水稳性团聚体特征的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):695-700.
- [14] Rillig M C, Wright S F, Nichols K A, et al. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils[J]. Plant and Soil, 2001,233(2):167-177.
- [15] 马钦彦.中国油松生物量的研究[J].北京林业大学学报,1989(4):1-10.
- [16] Bedini S, Pellegrino E, Avio E, et al. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as

- affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradice*[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1491-1496.
- [17] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregate stability and size distribution[M]. *California: Methods of Soil Analysis Part Physical Methods*, 2002: 317-328.
- [18] Rillig M C, Wright S F, Eviner V T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: Comparing effects of five plant species [J]. *Plant and Soil*, 2002, 238(2): 325-333.
- [19] 李玮, 陈欢, 曹承富, 等. 不同施肥模式对砂姜黑土团聚体特征及有机碳的影响[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(32): 64-72.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [21] 魏孝荣, 邵明安, 高建伦. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系[J]. *环境科学*, 2008, 29(10): 2879-2884.
- [22] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Plant and Soil*, 1998, 198(1): 97-107.
- [23] Zhu G Y, Shanguan Z P, Deng L. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon and nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2017, 149: 253-260.
- [24] Wei X R, Li X Z, Jia X X, et al. Accumulation of soil organic carbon in aggregates after afforestation on abandoned farmland[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(6): 637-646.
- [25] Borkovec M, Wu Q, Degovics G, et al. Surface area and size distributions of soil particles[J]. *Colloids Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1993, 73: 65-76.
- [26] Liao C Z, Luo Y Q, Fang C M, et al. Ecosystem carbon stock influenced by plantation practice: Implications for planting forests as a measure of climate change mitigation[J]. *PLoS One*, 2010, 5(5): e10867.
- [27] Qiu L P, Wei X R, Zhang X C, et al. Soil organic carbon losses due to land-use change in a semiarid grassland[J]. *Plant and Soil*, 2012, 355(1/2): 299-309.
- [28] 孙利鹏. 子午岭天然辽东栎群落恢复影响土壤性质的过程和机制[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [29] Lovelock K E, Wright S F, Clark D A, et al. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape[J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92(2): 278-287.
- [30] Wright S F, Upadhyaya A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Soil Science*, 1996, 161(9): 575-586.
- [31] 肖玖军, 邢丹, 毛明明, 等. AM 真菌对桑树根围土壤团聚体的影响机制[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3): 773-782.
- [32] Wang Q, Teng Z, Wang J J, et al. Elevation distribution of fine root biomass and soil organic carbon storage of mature Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations in east China[J]. *Polish Journal of Ecology*, 2020, 68(1): 84-93.
- [33] 梁启鹏, 余新晓, 庞卓, 等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 889-893.
- [34] 朱丽平, 蔡永茂, 康满春, 等. 华北土石山区油松和元宝枫人工林土壤有机碳特征[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(1): 97-105.
- [35] 王岩松, 马保明, 高海平, 等. 晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(8): 81-93.
- [36] 王凯, 赵成娇, 张日升, 等. 不同密度樟子松人工林土壤碳氮磷化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(3): 741-748.
- [37] 陈龙斌, 孙昆, 张旭, 等. 林隙干扰对森林生态系统的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 701-710.
- [38] 王立超, 夏江宝, 赵玉尧, 等. 密度调控对鲁北黄泛平原区人工林土壤物理性质及植物多样性的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 43-48, 56.
- [39] 金虎范. 林分密度对华北落叶松人工林凋落物分解影响的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [40] 张恒宇, 孙树臣, 吴元芝, 等. 黄土高原不同植被密度条件下土壤水、碳、氮分布特征[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(5): 875-884.
- [41] 张晓曦, 周雯星, 李佳佳, 等. 早期分解中油松与阔叶树种凋落叶混合分解效应及其相互影响[J]. *植物科学学报*, 2019, 37(3): 303-311.
- [42] 李茜, 刘增文, 米彩虹, 等. 黄土高原油松与其他树种凋落叶混合分解对土壤性质的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(5): 935-943.