

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.024

韦自强,郑磊,贺怀宇,等.大兴安岭重度火烧迹地不同林龄落叶松人工林土壤团聚体养分特征[J].水土保持学报,2024,38(1):347-356.

WEI Ziqiang, ZHENG Lei, HE Huaiyu, et al. Nutrient characteristics of soil aggregates in *Larix gmelinii* plantations of different forest ages from seriously burned area in great Khingan Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):347-356.

大兴安岭重度火烧迹地不同林龄落叶松 人工林土壤团聚体养分特征

韦自强¹, 郑磊², 贺怀宇³, 王振国³, 伊怀虎¹, 任鹏¹, 辛颖¹

(1.林木遗传育种国家重点实验室(东北林业大学), 哈尔滨 150040; 2.辽宁省本溪市城市运行服务中心, 辽宁 本溪 117099;
3.大兴安岭林业集团公司阿木尔林业局, 黑龙江 漠河 165302)

摘要: [目的] 为探寻大兴安岭重度火烧迹地植被恢复后不同林龄落叶松人工林下土壤团聚体养分含量与分布的变化。[方法] 以大兴安岭 1987 年发生特大森林火灾形成的重度火烧迹地上分别在 1989 年、2000 年、2010 年种植的落叶松人工林(11, 21, 32 年)作为研究对象, 通过测定土壤团聚体各粒级有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾的含量, 开展土壤团聚体养分分布特征研究。[结果] (1) 在重度火烧迹地上不同林龄的落叶松人工林中, 土壤各粒级团聚体有机碳、全氮、全磷、碱解氮和速效钾的含量均随着粒径的减小逐渐上升, <0.5 mm 粒级含量最大。(2) 随着落叶松人工林林龄的增长, 土壤各粒级团聚体有机碳、全氮、全磷、碱解氮和速效磷含量均逐渐上升。32 年落叶松人工林土壤团聚体有机碳、全氮、全磷、碱解氮和速效磷含量相较于 11 年落叶松人工林分别显著增加 77.35%~130.24%, 77.61%~143.36%, 105.84%~147.98%, 94.58%~155.96%, 206.98%~537.09% ($p<0.05$)。21 年落叶松人工林土壤各粒级团聚体有机碳含量高于 11 年落叶松人工林, 但二者无明显差异。(3) 土壤各粒级团聚体有机碳与全氮和碱解氮极显著相关 ($p<0.01$), 土壤有机碳和碱解氮含量与 <0.25 mm 粒级含量相关性最强, 全氮、全磷、速效磷和速效钾与 >0.25 mm 粒级含量极显著相关 ($p<0.01$)。[结论] 落叶松人工林土壤团聚体养分呈表聚现象。大兴安岭重度火烧迹地上种植的落叶松人工林, 随着林龄的增大土壤团聚体养分含量增加, 种植 32 年的落叶松人工林显著提升土壤团聚体的养分含量, 研究结果可为大兴安岭重度火烧迹地人工植被恢复工作提供科学依据。

关键词: 大兴安岭; 落叶松人工林; 火烧迹地; 团聚体养分

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0347-10

Nutrient Characteristics of Soil Aggregates in *Larix gmelinii* Plantations of Different Forest Ages from Seriously Burned Area in Great Khingan Mountains

WEI Ziqiang¹, ZHENG Lei², HE Huaiyu³, WANG Zhenguo³, YI Huaihu¹, REN Peng¹, XIN Ying¹

(1. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China; 2. Urban Operation Service Center of Benxi City, Benxi, Liaoning 117099, China;

3. Daxing'anling Forestry Group Corporation Amur Forestry Bureau, Mohe, Heilongjiang 165302, China)

Abstract: [Objective] In order to know the changes of nutrient content and distribution of soil aggregates under *Larix gmelinii* plantation of different forest ages after vegetation restoration in severely burned areas of Greater Khingan Mountains. [Methods] Takes the *Larix gmelinii* plantation (11, 21 and 32 years) planted in 1989, 2000 and 2010 on the severely burned areas formed by the severe forest fire in Greater Khingan Mountains in 1987 as the research object. By measuring the contents of organic carbon, total nitrogen, total

收稿日期: 2023-06-25

修回日期: 2023-09-29

录用日期: 2023-10-07

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-11-08

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572019BA11); 国家重点研发计划项目(2021YFD2200303); 林木遗传育种国家重点实验室创新项目(2022A03)

第一作者: 韦自强(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: wzq6661997hhh@163.com

通信作者: 辛颖(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: xinying2004@126.com

phosphorus, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium in soil aggregates, the nutrient distribution characteristics of soil aggregates were studied. [Results] (1) The contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, alkali-hydrolyzed nitrogen and available potassium in soil aggregates of different particle sizes increased gradually with the decrease of particle size, and the content of < 0.5 mm particle size was the largest. (2) As the age of forest increased, the content of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, alkali hydrolyzed nitrogen and available phosphorus in soil aggregates gradually increased. The nutrient content of soil aggregates in 32 years *Larix gmelinii* plantation was significantly higher than that in 11 years *Larix gmelinii* plantation. The contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, alkali-hydrolyzed nitrogen and available phosphorus in soil aggregates were significantly increased by 77.35%~130.24%, 77.61%~143.36%, 105.84%~147.98%, 94.58%~155.96% and 206.98%~537.09%, respectively, compared with 11 years *Larix gmelinii* plantation ($p < 0.05$). The organic carbon content of soil aggregates at different particle sizes in 21 years was higher than that in 11 years *Larix gmelinii* plantation, but there was no significant difference. (3) There was a strong correlation between organic carbon and total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen in soil aggregates ($p < 0.01$). Soil organic carbon and alkali-hydrolyzed nitrogen content had the strongest correlation with < 0.25 mm fraction content. Total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and available potassium had the strongest correlation with > 0.25 mm fraction content ($p < 0.01$). [Conclusion] The nutrient of soil aggregates in *Larix gmelinii* plantation showed surface aggregation. The nutrient content of soil aggregates in *Larix gmelinii* plantations planted on severely burned areas in Greater Khingan Mountains increased with the increase of forest age. The *Larix gmelinii* plantation planted for 32 years significantly increased the nutrient content of soil aggregates. The results provide a scientific basis for the restoration of artificial vegetation in the severely burned area of Greater Khingan Mountains.

Keywords: Greater Khingan Mountains; *Larix gmelinii* plantation; burned area; aggregate nutrients

Received: 2023-06-25

Revised: 2023-09-29

Accepted: 2023-10-07

Online(www.cnki.net): 2023-11-08

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,是评价土壤质量与肥力水平的重要指标,它是由矿物颗粒与有机物质通过凝聚或胶结作用形成的^[1-2]。团聚体各粒径含量分布的差异不仅影响着土壤的形态特征与孔隙特征,还在养分的供应、保持与转化方面有着重要作用^[3]。土壤有机碳(SOC)对于表征土壤健康有着重要意义,被认为是评价土壤质量和肥力水平的重要指标^[4]。氮(N)、磷(P)和钾(K)作为陆地生态系统中重要的养分库,是植被生长发育所必需的3种矿质性营养元素和关键性的限制元素^[5]。土壤团聚体是储存与供给土壤中C、N、P和K这些养分的主要场所^[6]。不同粒级团聚体对土壤养分的固定与转化能力有所不同,因此研究土壤养分在各粒级团聚体中的分布特征,对于了解土壤养分固持与循环具有重要意义。

林火是一种常见的森林干扰类型,全球平均每年有1%的森林受到火烧的影响^[7]。它对于森林生态系统的作用具有两面性,一方面通过加热和氧化的方式引起森林土壤理化性质以及生物环境的改变^[8],调

整森林结构组成,维持生态平衡,促进森林演替^[9-10];另一方面,高强度的火干扰导致土壤养分大量流失,破坏土壤结构和恶化土壤孔隙,表层微生物和土壤无脊椎动物数量骤变^[11],造成水土流失等不良后果。目前,国内外学者针对火烧对土壤养分的影响进行了研究,任清胜等^[12]研究发现,重度火烧显著增加了大兴安岭落叶松天然林表层土壤及土壤团聚体SOC含量;LUCAS-BORJA等^[13]研究发现,西班牙中东部松树林在重度火烧下SOC含量显著升高,N和P的含量降低,K含量则没有显著变化;LI等^[14]研究发现,大兴安岭冻土区落叶松林在重度火烧下显著降低土壤SOC和N的养分含量;王丽红^[15]研究发现,在重度火烧迹地人工植被恢复24年后,增大土壤C、N和P的含量。

大兴安岭是我国寒温带针叶林唯一分布区^[16-17],也是我国林火高发区,特别是1987年特大森林火灾,遗留了大量重度火烧迹地^[18]。火后陆续开展重度火烧迹地的植被恢复工作,种植大量的落叶松人工林。兴安落叶松(*Larix gmelinii*)是我国东北地区主要

速生树种,具有耐寒、耐旱、耐湿、耐腐的特点,存活率高同时对土壤中的水分和养分需求也不高。针对重度火烧迹地在不同恢复年限下土壤养分含量变化已开展了相关研究^[15],但是在大兴安岭重度火烧迹地上大量种植落叶松开展植被恢复的过程中,落叶松人工林土壤团聚体养分变化目前还不清楚。因此,本研究以大兴安岭在 1987 年特大森林火灾遗留的重度火烧迹地上种植的不同林龄落叶松人工林为研究对象,通过时空互代法,研究土壤各粒级团聚体养分特征,探讨在重度火烧迹地植被恢复过程中落叶松人工林对土壤团聚体养分的影响,为大兴安岭地区重度火烧迹地植被恢复提供科学依据。

1 研究区概况

试验区选取在黑龙江省大兴安岭地区阿木尔林业局红旗林场,地理坐标(122°38′30″—124°05′05″E, 52°15′03″—53°33′15″N),海拔 255~1 396 m。研究区属于寒温带大陆性气候,夏季短暂,降水较为集中,冬季寒冷且漫长。年平均气温-4.94℃,年平均降

水量 429~527 mm,全年无霜期 80~100 天,冰封期 180~200 天,年日照时间为 2 630 h。土壤主要为棕色针叶林土,其余区域还有沼泽土与泥炭土等,土层薄,有石砾。针叶乔木树种主要有兴安落叶松和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*),阔叶乔木树种主要有白桦(*Betula platyphylla*)和山杨(*Populus davidiana*)^[15]。

2 研究方法

2.1 样地设置

2021 年 9 月,在阿木尔林业局红旗林场进行实地踏查,选取在 1987 年特大森林火灾后形成的重度火烧迹地上种植了 11,21,32 年的落叶松人工林为研究对象,所选样地立地条件一致,重度火烧前均为落叶松林。在恢复过程中均未受到采伐等各种人类活动的干扰。落叶松人工林在造林时均是人工穴状整地,造林密度是 3 300 株/hm²,造林后连续抚育 3 年。在每种林分内分别设置 3 个 20 m×30 m 的调查样地,样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic information of sample land

样地	造林年份	坡度/(°)	坡向	海拔/m	胸径/cm	树高/m	林下植被
11 年落叶松人工林	2010	3	阳坡	537	3.67	4.20	越橘、兴安杜鹃、东北延胡索(<i>Corydalis ambigua</i>)和地榆(<i>Sanguisorba officinalis</i>)
21 年落叶松人工林	2000	5	半阳坡	544	5.12	5.93	越橘、笃丝越橘(<i>Vaccinium uliginosum</i>)、西伯利亚铁线莲(<i>Clematis sibirica</i>)和红花鹿蹄草(<i>Pyrola incarnata</i>)
32 年落叶松人工林	1989	6	阳坡	544	15.20	14.13	兴安杜鹃、越橘、小叶章(<i>calamagrostis angustifolia</i>)和羊胡子苔草(<i>Carex callitrichos</i>)

2.2 样品采集与处理

进行样品采集时,在每个样地内按照“Z”字形设置 5 个采样点,除去地表的枯落物层,因研究地土层很薄,以 10 cm 为 1 层机械分层采集土壤样品。每个采样点分 0—10,10—20 cm 土层,用硬质塑料样品盒取约 1.5 kg 原状土样,取样时避免挤压,保持土壤团聚体的结构,用于团聚体粒径分级及其养分含量的测定,每层 3 个重复。同时再一一对应采集 100 g 土壤样品置于封口袋内带回实验室,用于土壤基本化学性质的测定。运输过程中为防止团聚体破坏,将装有团聚体的盒子用气泡膜包好后置于泡沫纸箱中运回实验室。土样按照其自然纹理轻轻掰成直径约 10 mm 的小块后在室内阴凉处风干,挑去里面的石块与植物残体后准备进行土壤团聚体的筛分。

团聚体筛分采用沙维诺夫干筛法,用 5,2,1,0.5,0.25 mm 的套筛将风干土样进行筛分,将每层得到的土样收集起来,得到>5,5~2,2~1,1~0.5,0.5~0.25,<0.25 mm 的粒级,每个样品重复 3 次。将每

个取样点同一粒径的土样等质量均匀混合后,分别过 0.15,1 mm 的筛,用于土壤养分含量的测定。

2.3 指标测定

土壤团聚体有机碳含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定;全氮含量采用硫酸钾—硫酸铜—硒粉消煮法,消煮液用凯氏定氮仪测定;全磷含量采用硫酸—高氯酸消煮,待测液定容摇匀静置后用钼锑抗比色法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效磷含量采用氟化铵—氯化氢浸提后采用钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用 pH=7 的 1 mol/L 的醋酸铵浸提后用火焰光度计测定^[19]。样地土壤基本化学性质见表 2。

2.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2019 软件进行整理和计算,运用 SPSS 27.0 软件的单因素方差分析(One—Way ANOVA)和 Duncan(D)对数据进行差异显著性检验($p<0.05$),采用 spearman 相关分析法对团聚体各粒级养分之间进行相关性分析。图表选用 Origin 2022 软件制作。

表 2 不同林龄落叶松人工林土壤基本化学性质
Table 2 Basic chemical properties of soil in different *Larix gmelinii* plantations

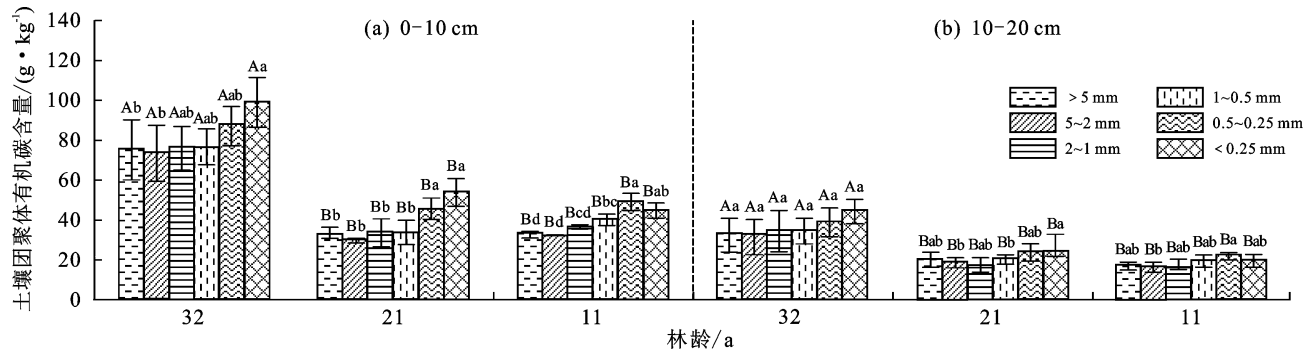
样地	土层深度/ cm	pH	有机碳/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
11 年落叶松人工林	0—10	4.63	33.65	1.56	0.48	128.47	25.83	55.10
	10—20	4.81	15.54	0.91	0.35	77.53	11.26	44.24
21 年落叶松人工林	0—10	4.30	41.84	1.93	0.59	153.77	37.64	82.66
	10—20	4.46	18.24	1.10	0.55	89.88	29.83	72.15
32 年落叶松人工林	0—10	4.36	85.16	3.94	1.10	307.77	119.87	114.41
	10—20	4.53	41.06	2.07	0.78	182.85	72.26	67.06

3 结果与分析

3.1 土壤团聚体全量养分特征

由图 1 可知,土壤团聚体有机碳含量随着落叶松人工林土壤团聚体粒径的减小表现为先减小后增大的趋势。不同林龄落叶松人工林 0—10,10—20 cm 土层土壤各粒级团聚体有机碳含量分别为 29.67~99.09,16.35~44.30 g/kg。11 年落叶松人工林土壤 0.5~0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量最高,21,32 年落叶松人工林土壤<0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量最高。0—10 cm 土层中,<0.25 mm 粒级团聚

体有机碳含量显著高于>5,5~2 mm 粒级($p<0.05$),分别是它们的 1.16~1.60,1.20~1.81 倍。32 年落叶松人工林土壤团聚体有机碳含量相较于 11,21 年落叶松人工林分别增加 77.35%~130.24%,84.11%~147.80%。在 10—20 cm 土层中,32 年落叶松人工林土壤团聚体有机碳相较于 11,21 年落叶松人工林分别显著增加 77.75%~126.61%,61.37%~97.12%。21 年落叶松人工林土壤各粒级团聚体有机碳含量高于 11 年落叶松人工林,但二者无明显差异($p>0.05$)。



注:图柱上方不同小写字母表示同一林龄下不同粒级之间差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示同一粒级不同林龄之间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 不同林龄落叶松人工林土壤团聚体有机碳含量

Fig. 1 Organic carbon content of soil aggregates in different *Larix gmelinii* plantations

由图 2 可知,不同林龄落叶松人工林土壤各粒级团聚体全氮含量随着粒径的减小呈现先减小后增大的趋势。不同林龄落叶松人工林,0—10,10—20 cm 土层土壤各粒级团聚体全氮含量分别为 1.25~4.06,0.77~2.10 g/kg。在 0—10 cm 土层中,落叶松人工林土壤 0.5~0.25,<0.25 mm 粒级团聚体全氮含量均显著高于>5,5~2,2~1 mm 粒级。32 年落叶松人工林土壤团聚体全氮含量显著上升,相较于 11,21 年落叶松人工林分别增加 77.61%~131.30%和 90.72%~109.68%。10—20 cm 土层中,随着落叶松人工林林龄的增加,土壤各粒级团聚体全氮含量逐渐增加。32 年落叶松人工林土壤各粒级团聚体全氮含量养分相较于 11,21 年落叶松人工林提升 95.31%~143.36%和 66.31%~99.52%。

由图 3 可知,不同林龄落叶松人工林 0—10,10—20 cm 土层土壤各粒级团聚体全磷含量分别为 0.41~1.19,0.33~0.85 g/kg。0.5~0.25 mm 粒级团聚体全磷含量最大,>5 mm 粒级团聚体全磷含量最小,前者是后者的 1.16~1.42 倍。随着落叶松人工林林龄的增加,土壤团聚体全磷含量逐渐增加。0—10 cm 土层,32 年落叶松人工林土壤>5,5~2 mm 粒级团聚体全磷含量相较于 11 年落叶松人工林提升明显,分别增长 147.98%和 147.89%($p<0.05$)。10—20 cm 土层,32 年落叶松人工林土壤 5~2,<0.25 mm 粒级团聚体全磷含量显著高于 11 年落叶松人工林,分别提升 133.47%和 133.71%。在落叶松人工林中,0—10 cm 土层土壤各粒级团聚体的全量养分含量均高于 10—20 cm 土层,表现出明显的表聚特征。

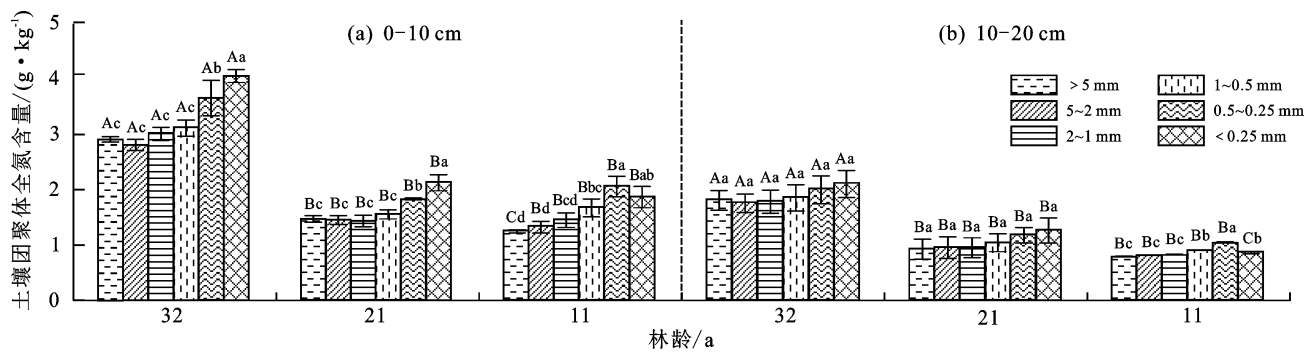


图 2 不同林龄落叶松人工林土壤团聚体全氮含量

Fig. 2 Total nitrogen content of soil aggregates in different *Larix gmelinii* plantations

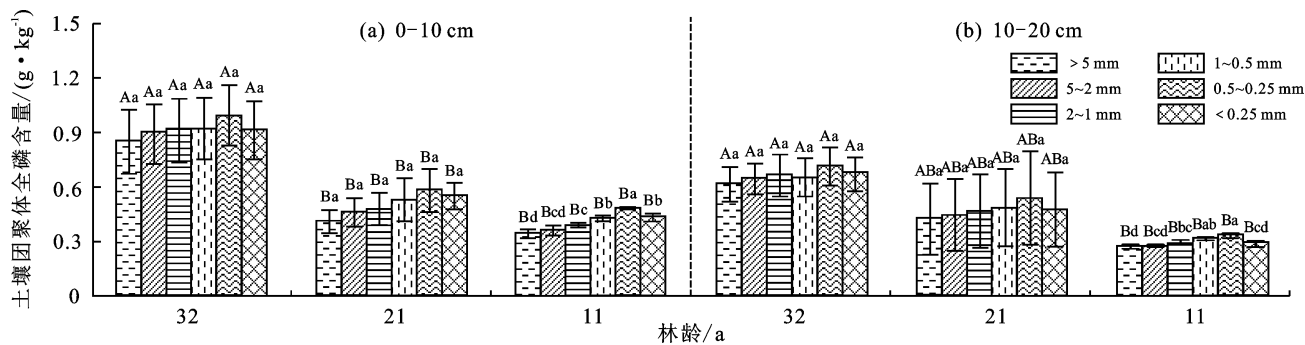


图 3 不同林龄落叶松人工林土壤团聚体全磷含量

Fig. 3 Total phosphorus content of soil aggregates in different *Larix gmelinii* plantations

3.2 土壤团聚体速效养分特征

由图 4 可知,不同林龄落叶松人工林土壤团聚体碱解氮含量均表现为随着粒径的减小含量逐渐上升。0—10 cm 土层中,落叶松人工林土壤团聚体碱解氮含量为 101.00~335.26 mg/kg。随着落叶松人工林林龄的增加,11,21 年落叶松人工林土壤各粒级团聚体碱解氮含量随着粒径的减小而显著升高 ($p < 0.05$),32 年落叶松人工林其含量之间差异不显著 ($p > 0.05$)。

随着落叶松人工林林龄的增加,土壤团聚体碱解

氮含量逐渐升高,32 年落叶松人工林土壤团聚体碱解氮含量显著增加,相较于 11,21 年落叶松人工林分别提高 94.58%~155.96% 和 79.81%~125.09%。在 10—20 cm 土层,落叶松人工林土壤各粒级团聚体碱解氮含量为 70.90~178.43 mg/kg,同时各粒级团聚体碱解氮含量之间差异不显著。11 年与 21 年落叶松人工林土壤各粒级团聚体碱解氮含量之间无明显差异,32 年落叶松人工林土壤团聚体中含量明显提升,分别相较于 11 年与 21 年落叶松人工林分别提高 100.57%~125.20% 和 68.71%~97.07%。

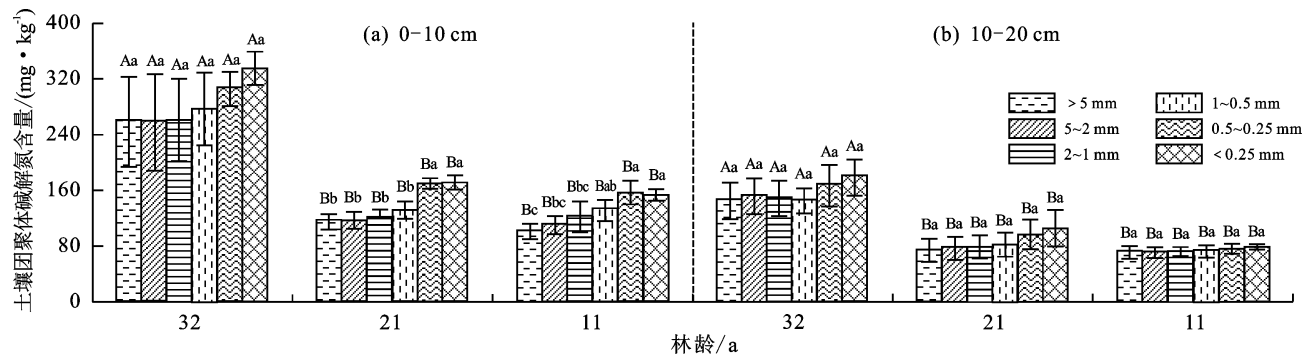


图 4 不同林龄落叶松人工林土壤团聚体碱解氮含量

Fig. 4 Alkaline hydrolyzed nitrogen content of soil aggregates in different *Larix gmelinii* plantations

由图 5 可知,不同林龄落叶松人工林土壤各粒级团聚体速效磷含量差异较大,随着粒径的减小其呈现一定的波动变化特征。在 0—10 cm 土层,落叶松人工林各粒级团聚体速效磷含量为 22.73~129.95 mg/

kg,11 年落叶松人工林土壤团聚体 0.5~0.25, <0.25 mm 团聚体粒级速效磷含量显著高于其他粒级 ($p < 0.05$),21 年与 32 年落叶松人工林土壤各粒级团聚体速效磷含量之间没有显著差异 ($p > 0.05$)。随着落叶

随着粒级的减小,SOC 与 TN 相关系数总体呈上升趋势,在<0.25 mm 粒径最大。SOC 与 AN 的相关系数随着粒径的减小呈现先升高后降低再增高的趋势,同样是<0.25 mm 粒径相关系数最高。TP 与 AP 之间也呈现极显著正相关,随着粒径的减小相

关系数逐渐降低。各粒径土壤团聚体 TN 和 AN 对 TP 和 AP 呈现极显著正相关($p<0.01$),要高于 SOC 与 TP 和 AP 的相关性。各粒径土壤团聚体的 AK 与 TN、AN 和 TP 之间存在极显著正相关($p<0.01$)。

表 3 落叶松人工林土壤团聚体各养分之间的相关性

Table 3 Correlation between nutrients in soil aggregates of *Larix gmelinii* plantations

项目	相关系数					
	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
SOC—TN	0.860**	0.835**	0.864**	0.907**	0.930**	0.979**
SOC—TP	0.662**	0.628**	0.649**	0.688**	0.647**	0.732**
SOC—AN	0.831**	0.825**	0.878**	0.876**	0.862**	0.946**
SOC—AP	0.684**	0.631**	0.622**	0.645**	0.633**	0.622**
SOC—AK	0.558*	0.418	0.595**	0.585*	0.655**	0.705**
TN—TP	0.853**	0.860**	0.818**	0.759**	0.701**	0.779**
TN—AN	0.950**	0.961**	0.938**	0.967**	0.899**	0.975**
TN—AP	0.818**	0.792**	0.789**	0.705**	0.631**	0.666**
TN—AK	0.631**	0.692**	0.620**	0.670**	0.608**	0.674**
TP—AN	0.820**	0.847**	0.781**	0.763**	0.794**	0.810**
TP—AP	0.905**	0.913**	0.893**	0.880**	0.839**	0.868**
TP—AK	0.626**	0.715**	0.707**	0.715**	0.697**	0.699**
AN—AP	0.750**	0.779**	0.713**	0.676**	0.676**	0.699**
AN—AK	0.698**	0.602**	0.585*	0.703**	0.742**	0.676**
AP—AK	0.437	0.521*	0.523*	0.548*	0.511*	0.455

注:相关性分析采用 spearman 相关分析(双尾检测);* * 表示差异极显著($p<0.01$);* 表示差异显著($p<0.05$)。下同。

为进一步明确土壤养分与土壤团聚体对应养分之间的相关性,对土壤养分和各粒径土壤团聚体中的有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾之间的关系进行逐步回归分析(表 4)。土壤与团聚体对应养分的回归系数为 0.84~0.99。土壤有机碳与<0.25 mm 粒径有机碳含量呈极显著正相关($p<0.01$),土壤全氮与>5 mm 粒径的全氮含量呈极显著正相关,土壤全磷与 1~0.5 mm 粒径的全磷含量呈极显著正相关,土壤碱解氮与<0.25 mm 粒径的碱解氮含量呈极显著正相关,土壤速效磷与>5 mm 粒径的速效磷含量呈极显著正相关,土壤速效钾与 1~0.5 mm 粒径的速效钾含量呈极显著正相关。

表 4 落叶松人工林土壤养分与团聚体各粒径养分之间的逐步回归方程

Table 4 Stepwise regression equation between soil nutrients and aggregate nutrients in *Larix gmelinii* plantations

土壤养分	回归方程	R ²	显著性水平
有机碳	SOC _{Soil} =0.85SOC<0.25 mm-1.67	0.929	<0.01
全氮	TN _{Soil} =1.39TN>5 mm-0.19	0.953	<0.01
全磷	TP _{Soil} =1.03TP1~0.5 mm-0.04	0.991	<0.01
碱解氮	AN _{Soil} =0.89AN<0.25 mm+5.05	0.909	<0.01
速效磷	AP _{Soil} =1.18AP>5 mm+2.06	0.915	<0.01
速效钾	AK _{Soil} =0.92AK1~0.5 mm+1.73	0.848	<0.01

4 讨论

4.1 落叶松人工林不同粒径土壤团聚体养分变化特征

大兴安岭重度火烧迹地上种植不同林龄的落叶松人工林,除 32 年落叶松人工林土壤团聚体速效磷含量外,有机碳、全氮、全磷和碱解氮含量总体上均随着粒径的减小而增大。土壤团聚体作为养分固持与循环的主要场所,各粒径的养分含量分布上具有一定的差异性。也有研究^[20]发现,大兴安岭重度火烧后在不同恢复方式下,土壤团聚体有机碳和全氮含量随着粒径的增大而增大。较小粒径的土壤团聚体中的有机碳主要以较为稳定的腐殖质碳为主,其不断积累导致有机碳含量较高,而大团聚体的有机碳主要以易矿化、易分解的活性有机碳为主,由于活性有机碳的不断分解导致其有机碳含量逐渐降低^[21]。土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾在较小粒径团聚体养分含量高,可能是土壤中较小的团聚体含有较多的黏粒矿物和金属氧化物,对养分的吸附能力较强,同时与大团聚体相比具有更大的比表面积,能进一步吸附土壤中的养分^[22]。另外,干筛法与湿筛法相比能够降低筛分时各粒径养分含量溶解和流失的影响^[23]。

4.2 不同林龄落叶松人工林土壤团聚体养分含量变化特征

大兴安岭重度火烧迹地在种植 32 年落叶松人工

林后,土壤各粒级团聚体有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量均显著增高。除全磷和速效磷外,3 个林龄的落叶松人工林 0—10 cm 土层土壤各粒级团聚体养分含量均高于 10—20 cm 土层。由于土壤碳、氮的主要来源是植物根系的分泌物及凋落物的分解^[24-25],在重度火烧发生时,降低林地的郁闭度,充足的光照及营养物质的摄入使得恢复初期植被多样性提升^[26],因此植被恢复初期主要以灌木和草本作为土壤养分的主要摄入来源^[27]。在植被恢复的过程中,由于郁闭度的上升使得林下物种多样性降低,可供分解的枯落物逐渐以落叶松叶子为主,针叶树种的凋落物一般含有较多的木质素和酚类化合物,分解较为缓慢^[27]。落叶松作为一种速生树种在生长阶段对养分需求较高,使得 11 年和 21 年落叶松人工林土壤团聚体粒级之间养分含量提升效果不显著。同时植物根系分泌物的输入也使落叶松人工林土壤团聚体有机碳和全氮升高。落叶松人工林土壤有机碳与全氮和碱解氮的相关系数最大,说明在大兴安岭火烧迹地植被恢复的过程中二者的耦合性很强。王丽红^[15]研究大兴安岭重度火烧迹地植被恢复发现,土壤有机碳与全氮和碱解氮均呈现极显著正相关性,研究结果与本文一致。土壤磷的来源与漫长的岩石风化相关,在 0—60 cm 土层中风化程度类似,土层中磷含量分布较为均匀^[28]。研究区土层较薄,3 个林龄的落叶松人工林 0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层团聚体全磷和速效磷含量差异不大。但是凋落物的分解也能为土壤提供磷含量,因此随着落叶松人工林林龄的增大土壤磷的含量在逐渐增加。32 年落叶松人工林林冠层较大,增加降雨截留能力,凋落物层增厚可以降低雨水的冲刷与减少径流,能够减少养分流失,提升土壤养分含量。落叶松是浅根系树种,根系更多分布在表层土壤,因此根系残体及根系分泌物所产生的养分均先供应给表层,凋落物的分解也同样先供应表层,导致表层土壤养分含量整体上高于下层土壤^[29]。

5 结论

(1)在大兴安岭重度火烧迹地上 3 个不同林龄的落叶松人工林,土壤团聚体有机碳、全氮、全磷、碱解氮和速效钾的含量均随着粒径的减小逐渐上升,在 <0.5 mm 粒级中含量最大。

(2)随着落叶松人工林林龄的增长,土壤各粒级团聚体有机碳、全氮、全磷、碱解氮和速效磷含量均逐渐上升,32 年落叶松人工林土壤各粒级团聚体养分含量比 11 年落叶松人工林分别提升 77.35 ~ 130.24%, 77.61 ~ 143.36%, 105.84 ~ 147.98%, 94.58 ~ 155.96%, 206.98 ~ 537.09%。落叶松人工林

土壤团聚体养分具有明显的表聚特征。

(3)落叶松人工林土壤各粒级团聚体有机碳、全氮、全磷、碱解氮和速效磷之间均具有强相关性,有机碳与全氮和碱解氮之间的相关性最强。土壤有机碳和碱解氮含量与 <0.25 mm 粒级含量相关性最强,全氮、全磷、速效磷和速效钾与 >0.25 mm 粒级含量相关性最强。

在大兴安岭 1987 特大森林火灾后开展人工植被恢复的 30 多年间,种植了 32 年的落叶松人工林与 11 年和 21 年相比,显著提升了土壤团聚体养分含量,研究结果可为大兴安岭重度火烧迹地开展植被恢复工作提供科学依据。

参考文献:

- [1] SINGH S, SINGH J S. Microbial biomass associated with water-stable aggregates in forest, savanna and cropland soils of a seasonally dry tropical region, India [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27 (8): 1027-1033.
- [2] BUCKA F B, KÖLBI A, UTEAU D, et al. Organic matter input determines structure development and aggregate formation in artificial soils[J]. Geoderma, 2019, 354: e113881.
- [3] 黄永珍,王晟强,叶绍明.杉木林分类型对表层土壤团聚体有机碳及养分变化的影响[J].应用生态学报, 2020, 31(9): 2857-2865.
HUANG Y Z, WANG S Q, YE S M. Effects of *Cunninghamia lanceolata* stand types on the changes of aggregate-related organic carbon and nutrients in surface soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31 (9): 2857-2865.
- [4] SRIVASTAVA P, SINGH R, TRIPATHI S, et al. Soil carbon dynamics under changing climate: a research transition from absolute to relative roles of inorganic nitrogen pools and associated microbial processes: A review[J]. Pedosphere, 2017, 27(5): 792-806.
- [5] 乔璐,陈立新,董诚明.基于高光谱遥感技术对土壤氮磷钾的估算[J].森林工程, 2018, 34(6): 25-31, 71.
QIAO L, CHEN L X, DONG C M. Estimates of soil N, P, K concentration by using hyperspectral remote sensing technology[J]. Forest Engineering, 2018, 34(6): 25-31, 71.
- [6] 区晓琳,陈志彪,姜超,等.植被恢复对亚热带侵蚀红壤团聚体养分分布的影响[J].水土保持学报, 2016, 30 (6): 230-238.
OU X L, CHEN Z B, JIANG C, et al. Effect of vegetation restoration on nutrient distribution within aggregate of subtropical eroded red soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 230-238.
- [7] FRASER R H, LI Z. Estimating fire-related parameters

- in boreal forest using SPOT VEGETATION [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(1): 95-110.
- [8] HART S C, DELUCA T H, NEWMAN G S, et al. Post-fire vegetative dynamics as drivers of microbial community structure and function in forest soils[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1): 166-184.
- [9] LIU B, LIANG Y, HE H S, et al. Wildfire affects boreal forest resilience through post-fire recruitment in Northeastern China [J]. Ecological Indicators, 2022, 145: e109705.
- [10] 王博, 韩树文, 武英达, 等. 辽河源自然保护区油松林火烧迹地林木更新研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(4): 41-50.
- WANG B, HAN S W, WU Y D, et al. Forest regeneration of *Pinus tabulaeformis* burned area in Liaohuyuan Nature Reserve of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(4): 41-50.
- [11] CERTINI G. Effects of fire on properties of forest soils: A review[J]. Oecologia, 2005, 143(1): 1-10.
- [12] 任清胜, 辛颖, 赵雨森. 重度火烧对大兴安岭落叶松天然林土壤团聚体有机碳和黑碳的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(2): 29-36.
- REN Q S, XIN Y, ZHAO Y S. Impact of severe burning on organic carbon and black carbon in soil aggregates in natural *Larix gmelinii* forest of Great Xing'an Mountains[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(2): 29-36.
- [13] LUCAS-BORJA M E, De LAS HERAS J, MOYA N D, et al. Short-term effects of prescribed fires with different severity on rainsplash erosion and physico-chemical properties of surface soil in Mediterranean forests [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 322: e116143.
- [14] LI X, JIN H, WANG H, et al. Distributive features of soil carbon and nutrients in permafrost regions affected by forest fires in northern Da Xing'anling (Hinggan) Mountains, NE China[J]. Catena, 2020, 185: e104304.
- [15] 王丽红. 大兴安岭火烧迹地落叶松人工林生态效应研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- WANG L H. Ecological effects of *Larix gmelinii* plantation in burned areas of Great Xing'an Mountains [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.
- [16] 李金享, 春雪, 辛颖, 等. 火烧迹地在不同恢复方式下土壤氮素含量研究[J]. 森林工程, 2020, 36(4): 12-20.
- LI J T, CHUN X, XIN Y, et al. Research on characteristics of soil nitrogen content of burned area after different restorations[J]. Forest Engineering, 2020, 36(4): 12-20.
- [17] 吴晞, 赵雨森, 辛颖. 大兴安岭火烧迹地植被恢复过程中土壤氮素特征[J]. 森林工程, 2022, 38(2): 8-13, 104.
- WU X, ZHAO Y S, XIN Y. Distribution characteristics of soil nitrogen during vegetation restorations of burned area in Great Xing'an Mountains[J]. Forest Engineering, 2022, 38(2): 8-13, 104.
- [18] 春雪, 赵雨森, 辛颖, 等. 大兴安岭重度火烧迹地恢复后土壤磷形态与解磷细菌分布特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 388-398.
- CHUN X, ZHAO Y S, XIN Y, et al. Soil phosphorus forms and phosphorus solubilizing bacteria distribution after restoration from seriously burning in Greater Khingan Mountain areas, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 388-398.
- [19] 陈立新. 土壤实验实习教程[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2005: 98-187.
- CHEN L X. Soil experiment internship tutorial [M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2005: 98-187.
- [20] 李红运. 火烧迹地植被恢复方式对土壤团聚体微生物生物量的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- LI H Y. The effects on microbial biomass in soil aggregates of burned area under different restoration [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [21] 马瑞萍, 刘雷, 安韶山, 等. 黄土丘陵区不同植被群落土壤团聚体有机碳及其组分的分布[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 324-332.
- MA R P, LIU L, AN S S, et al. Soil organic carbon and its fractions in aggregates under different plant communities in the hill-gully region of the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 324-332.
- [22] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(5): 65-71.
- XU Y C, SHEN Q R. Influence of long term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle sizes [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(5): 65-71.
- [23] 郑子成, 何淑勤, 王永东, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 170-174.
- ZHENG Z C, HE S Q, WANG Y D, et al. Distribution feature of soil nutrients in aggregate under different land use [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 170-174.
- [24] 刘姝媛, 胡浪云, 储双双, 等. 3 种林木凋落物分解特征及其对赤红壤酸度及养分含量的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22(3): 11-17.
- LIU S Y, HU L Y, CHU S S, et al. Decomposition characteristics of three forest litters and their effects on acidity and nutrient content in lateritic red soil [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2013, 22(3): 11-17.

- [25] 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.
WANG X Y, ZHOU C, FENG W H, et al. Changes of soil aggregates and its organic carbon in Chinese fir plantations with different forest ages[J].Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(5):126-131.
- [26] KEELEY J E, LUBIN D, FOTHERINGHAM C J. Fire and grazing impacts on plant diversity and alien plant invasions in the southern sierra Nevada[J].Ecological Applications,2003,13(5):1355-1374.
- [27] 陈婷,郗敏,孔范龙,等.枯落物分解及其影响因素[J].生态学杂志,2016,35(7):1927-1935.
CHENT, XI M, KONG F L, et al. A review on litter decomposition and influence factors[J].Chinese Journal of Ecology,2016,35(7):1927-1935.
- (上接第 346 页)
- [32] ABANDA P A, COMPTON J S, HANNIGAN R E. Soil nutrient content, above-ground biomass and litter in a semi-arid shrubland, South Africa[J].Geoderma, 2011,164(3/4):128-137.
- [33] WANG S L, ZHANG W D, SANCHEZ F. Relating net primary productivity to soil organic matter decomposition rates in pure and mixed Chinese fir plantations [J].Plant and Soil,2010,334(1):501-510.
- [34] ZHOU L, SUN Y J, SAEED S, et al. The difference of soil properties between pure and mixed Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations depends on tree species[J].Global Ecology and Conservation,2020, 22:e01009.
- [35] 耿玉清,余新晓,岳永杰,等.北京山地森林的土壤养分状况[J].林业科学,2010,46(5):169-175.
GENG Y Q, YU X X, YUE Y J, et al.Variation of forest soil nutrient content in mountainous areas, Beijing[J].Scientia Silvae Sinicae, 2010,46(5):169-175.
- [36] 王利彦,周国娜,朱新玉,等.凋落物对土壤有机碳与微生物功能多样性的影响[J].生态学报,2021,41(7): 2709-2718.
WANG L Y, ZHOU G N, ZHU X Y, et al. Effects of litter on soil organic carbon and microbial functional diversity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (7): 2709-2718.
- [28] 刘兴诏,周国逸,张德强,等.南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征[J].植物生态学报,2010,34(1):64-71.
LIU X Z, ZHOU G Y, ZHANG D Q, et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in Southern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(1):64-71.
- [29] 郑颖,冯健,于世河,等.辽东山区不同密度落叶松人工幼龄林林木生长和土壤养分特性[J].中南林业科技大学学报,2022,42(1):94-103.
ZHENG Y, FENG J, YU S H, et al. Study on the forest growth and soil nutrient characteristics of *Larix* spp. plantations with different densities in mountainous area of Liaodong [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2022, 42(1): 94-103.
- [37] 白占国,万国江.贵州碳酸盐岩区域的侵蚀速率及环境效应研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,12(1): 1-7,46.
BAI Z G, WAN G J. Study on watershed erosion rate and its environmental effects in Guizhou Karst region [J].Journal of Soil and Water Conservation,1998,12 (1):1-7,46.
- [38] 李世华,牛铮,路鹏,等.基于主成分分析红壤有效含水量估算模型[J].农业工程学报,2007,23(5):92-94.
LI S H, NIU Z, LU P, et al.Red soil available water capacity statistical model based on principal component analysis[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007,23(5):92-94.
- [39] 欧阳帅,项文化,陈亮,等.南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制[J].水土保持学报,2021,35(5):1-9.
OUYANG S, XIANG W H, CHEN L, et al. Regulation mechanisms of forest vegetation restoration on water and soil erosion in mountainous and hilly area of southern China[J].Journal of Soil and Water Conservation,2021,35 (5):1-9.