

doi: 10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.007

火烧迹地恢复后不同稳定机制土壤有机碳库特征研究

路蕙铷, 林一萍, 韩莉, 辛颖*
(东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040)

摘要:以大兴安岭重度火烧迹地经过不同方式恢复的林分土壤为研究对象,采用物理-化学联合分组方法,研究未保护、物理保护、化学保护、生物化学保护、物理-化学保护和物理-生物化学保护有机碳组分含量特征及其与土壤总有机碳含量间的关系。结果表明,1)人工恢复的林分土壤总有机碳、未保护有机碳、物理保护有机碳、物理-化学保护有机碳、物理-生物化学保护有机碳和生物化学保护有机碳含量均显著高于自然恢复。化学保护有机碳含量在不同恢复方式下变化不显著。除化学保护有机碳和物理-化学保护有机碳外,其余各保护态有机碳均表现为上层土壤含量显著高于下层($P<0.05$)。2)2种恢复方式下的土壤有机碳组分均以未保护有机碳占比最高,物理-化学保护有机碳占比最低。与天然恢复相比,人工恢复下的土壤物理保护有机碳含量占比显著提高2.80%~3.19%($P<0.05$)。3)回归分析表明,除物理-化学保护有机碳和化学保护有机碳组分外,其余各保护态有机碳组分与总有机碳含量之间均呈极显著的正相关关系($P<0.001$)。大兴安岭重度火烧迹地经过32a的人工恢复,更利于土壤总有机碳积累,土壤未保护有机碳的积累更多。研究结果为该区域重度火烧迹地植被恢复提供科学依据。

关键词:土壤有机碳;物理-化学联合分组;重度火烧迹地;植被恢复;大兴安岭

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)02-0060-08

Research on Soil Organic Carbon Pool Characteristics of Seriously Burned Area After Different Restorations

LU Huiru, LIN Yiping, HAN Li, XIN Ying*
(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin China, 150040)

Abstract: The soil of forest with different restorations in seriously burned area of Great Xing'an Mountains was selected as research objects, the correlation between soil organic carbon (SOC) components of unprotected, physically protected, physical-chemically protected, physical-biochemically protected, chemically protected and biochemically protected and the total organic carbon (TOC) was investigated. The results showed that: 1) The contents of TOC, unprotected SOC, physically protected SOC, physical-chemically protected SOC, physical-biochemically protected SOC and biochemically protected SOC in artificial restoration forest were significantly higher than those in natural restoration forest. The content of chemically protected SOC did not change significantly under different restoration methods. Except for the chemically protected SOC and physical-chemically protected SOC, the content of other protected SOC at upper layer soil was significantly higher than that at subsoil ($P<0.05$). 2) Under two restoration methods, the proportion of unprotected SOC was the highest, the proportion of physical-chemically SOC was the lowest. Compared with natural restoration, the ratio of physical protected SOC content under artificial restoration was significantly increased by 2.80%~3.19% ($P<0.05$). 3) Except for physical-chemically SOC and chemically SOC, there was $P<0.001$ between the contents of the other SOC fractions and the TOC, according to the results of linear fitting. After 32 years of artificial restoration, soil total organic carbon and unprotected organic carbon accumulated more in seriously burned area of Great Xing'an Mountains. The results provided a scientific basis for vegetation restoration in seriously burned areas of the region.

Keywords: Soil organic carbon; physical-chemical fractionation; seriously burned area; vegetation restoration; Great Xing'an Mountains

收稿日期:2023-05-12

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572019BA11);东北林业大学国家级大学生创新创业训练计划项目(202110225019)。

第一作者简介:路蕙铷,硕士研究生。研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:L15732921660@163.com

*通信作者:辛颖,博士,副教授。研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:xinying2004@126.com

引文格式:路蕙铷,林一萍,韩莉,等.火烧迹地恢复后不同稳定机制土壤有机碳库特征研究[J].森林工程,2024,40(2):60-67.

LU H R, LIN Y P, HAN L, et al. Research on soil organic carbon pool characteristics of seriously burned area after different restorations[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):60-67.

0 引言

土壤碳库是陆地碳库的重要组成部分,在陆地生态系统循环中有举足轻重的地位^[1]。森林生态系统作为陆地生态系统中最大的固碳主体^[2],其土壤碳含量约占全球土壤碳库的73%,占陆地总碳库的46%。森林的碳汇功能在缓解气候变化方面发挥着重要作用^[3-4]。森林土壤有机碳的减排能力约为森林的9%、湿地的72%、农业和草原的47%^[1]。增加森林土壤有机碳(SOC)是森林管理的主要目标^[5-7],在维持全球碳平衡、推动全球碳循环以及调节全球气候等方面都具有重要意义。

近年来,由于全球气候变化的影响,森林火灾的发生频率和过火面积呈显著增加趋势^[8-10],影响了森林的固碳能力。大兴安岭林区是我国寒温带针叶林唯一现存区^[11],也是重要的生态功能区和生态敏感区,由于气候干燥、林下枯落物堆积,导致该地森林火灾频繁发生^[12]。火灾不仅会影响整个森林生态系统中的植物、动物和微生物等的生命活动,还会迅速改变森林土壤的理化性质,显著改变森林土壤有机碳的固存和转化^[13-14]。1987年大兴安岭发生的特大森林火灾,导致了大面积重度火烧迹地的形成。开展火烧迹地植被恢复过程中土壤有机碳的稳定机制研究,对于充分认识大兴安岭火干扰后森林生态系统土壤有机碳固存有重要意义。目前,关于不同恢复方式下大兴安岭火烧迹地土壤有机碳的研究多集中于微生物量有机碳、易氧化有机碳、黑碳及总有机碳的含量变化^[15-16],对火烧迹地植被恢复后土壤中不同保护态有机碳组分变化还知之甚少。而深入了解森林土壤的固碳机制对于最大程度地实现火烧森林生态系统的恢复至关重要^[17]。

物理化学联合分组法能够成功分离物理、化学和生物化学保护等各种保护机制的有机碳组分。本研究以大兴安岭重度火烧迹地不同方式恢复后的林分为研究对象,采用物理-化学联合分组法,研究恢复方式对不同稳定机制的土壤有机碳组分特征的影响。明确重度火烧迹地植被恢复后土壤有机碳库结构稳定性,为该区域重度火烧迹地植被恢复与重建提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省大兴安岭阿木尔林业局,

以黑龙江主航道为界,东西分别与塔河林业局和图强林业局相接,南与呼中林业局和内蒙古满归林业局接壤。地理坐标为:52°15'~53°33' N,122°38'~124°05' E。地处寒温带季风气候区,年平均气温-5℃,年平均降水量455 mm,全年无霜期90 d左右,春季干旱多风,易发生火灾,夏季短暂多雨,冬季寒冷且漫长,主风向为西北风。土壤以棕色针叶林土为主,另外也有沼泽土、泥炭土和暗棕壤等,土层普遍较薄,多砾石。

典型地带性植被类型为寒温带针叶林,以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)为主。主要的阔叶树种有山杨(*Populus davidiana*)和白桦(*Betula platyphylla*)等;主要灌木有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、刺玫(*Rosa davurica* Pall.)、兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、越橘(*Vaccinium vitisidaea*)和杜香(*Ledum palustre*);主要草本有小叶草(*Deyeuxia angustifolia*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)和鹿蹄草(*Pyrola calliantha*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

2021年9月初,对研究区内1987年“5·6”大火重度火烧迹地经过人工恢复和天然恢复的林分进行勘查,所选的林分在重度火烧发生前均为兴安落叶松林,土壤类型均为棕色针叶林土。在坡度、坡向和海拔等立地条件基本一致的林分中分别设置3个20 m×30 m的标准样地。人工恢复的林分是1989年在重度火烧迹地上栽植的兴安落叶松人工林,造林时苗龄为2 a,每公顷3 300株,之后连续3 a进行人工抚育。天然恢复林分的主要树种为生长状况良好的山杨和白桦,自重度火烧后未受到人为活动的干扰。样地基本信息见表1。

每个标准样地内按“S”形设置5个取样点,因研究地土层很薄,每个取样点以10 cm为一层进行机械分层,分别采集0~10 cm和10~20 cm层土样,去除动、植物残体及石砾后风干过2 mm筛备用。

1.2.2 物理-化学联合分组方法

土壤有机碳分组方法参考STEWART等^[18]的物理-化学联合方法进行分组,对其进行改进,将土壤有机碳分成6个碳库,即未保护有机碳(又称游离活性有机碳,包括粗颗粒有机碳cPOM和细颗粒有机碳fPOM)、物理保护有机碳(iPOM)、化学保护有机碳(HC-d_{clay}、HC-d_{silt})、物理-化学保护有机碳

表1 样地基本信息

Tab. 1 Basic situation of sampling sites

恢复方式 Restoration	火烧年份 Burned year	造林年份 Afforestation year	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	平均胸径/cm Average diameter at breast height	平均树高/m Average height	郁闭度 Canopy density
人工恢复 Artificial restoration	1987	1989	阳	6	15.20	14.13	0.8
天然恢复 Natural restoration	1987	天然更新	阳	7	8.52	9.22	0.6

($HC-\mu_{Clay}$ 、 $HC-\mu_{Silt}$)、物理-生物化学保护有机碳($NHC-\mu_{Clay}$ 、 $NHC-\mu_{Silt}$)和生物化学保护有机碳($NHC-d_{Clay}$ 、 $NHC-d_{Silt}$),具体操作步骤如下。

第一步为团聚体分组,称取20 g过2 mm筛的风干土样置于250 μm 和53 μm 套筛上,加入30个玻璃珠,置于微团聚体分离器中上下振荡20 min后,筛上部分为 $>250 \mu m$ 的粗颗粒有机碳组分(cPOM)和53~250 μm 的微团聚体组分。将 $<53 \mu m$ 的组分于900 r/min下离心7 min分离出游离态粉粒组分(d-Silt),随后于3 200 r/min下离心15 min得到游离态黏粒组分(d-Clay)。

第二步为密度分组,将第一步得到的微团聚体部分与35 mL的1.7 g/cm³碘化钠溶液放于离心管中混匀,静置20 min后,于4 000 r/min转速离心20 min。悬液经0.45 μm 的滤膜抽滤,得到细颗粒有机碳(fPOM)。沉淀部分与60 mL的5 g/L的六偏磷酸钠溶液混匀,在180 r/min的振率下加入12个玻璃珠振荡18 h后,过53 μm 筛,筛上组分为物理保护有机碳组分(iPOM)。溶液部分分离方法同上,得到闭蓄粉粒组分(μ -Silt)和闭蓄黏粒组分(μ -Clay)。

第三步为酸解,将游离态黏粉粒和闭蓄态黏粉粒各取0.5 g与25 mL的6 mol/L HCl混匀后,于95 $^{\circ}C$ 下回流16 h。酸解液用0.45 μm 滤纸抽滤,残留物为非酸解组分,分别为生物化学保护有机碳($NHC-d_{Clay}$ 、 $NHC-d_{Silt}$)和物理-生物化学保护有机碳($NHC-\mu_{Clay}$ 、 $NHC-\mu_{Silt}$)。而酸解组分,分别为化学保护有机碳($HC-d_{Clay}$ 、 $HC-d_{Silt}$)、物理-化学保护有机碳($HC-\mu_{Clay}$ 、 $HC-\mu_{Silt}$),是为全组分和非酸解组分之差。

全土样品及上述各烘干的土壤各组分,在60 $^{\circ}C$ 下烘干至恒重并称重,利用重铬酸钾外加热氧化法测定各组分中的有机碳含量。

1.2.3 数据统计分析

物理-化学保护有机碳和化学保护有机碳组分即为酸解组分,其含量为全组分和非酸解组分之差。土壤其他保护机制有机碳组分的含量均采用

式(1)计算

$$S_{OC}(i)_{content} = M_p(i) \times O_c(i)_{content} \quad (1)$$

式中: $S_{OC}(i)_{content}$ 为土壤*i*有机碳组分的含量,g/kg; $M_p(i)$ 为土壤中*i*物质组分的含量,%; $O_c(i)_{content}$ 为土壤*i*物质组分中有机碳含量,g/kg。

土壤各有机碳库含量占总有机碳的比例采用式(2)计算

$$A_p = S_{OC}(i)_{content} \times 100 / T_{OCcontent} \quad (2)$$

式中: A_p 为土壤*i*有机碳库的含量占总有机碳的比例,%; $T_{OCcontent}$ 土壤总有机碳含量,g/kg。

用SPSS 27.0软件对试验所得数据进行统计分析,采用单因素方差分析比较不同恢复方式、不同土层间测定结果的差异($P=0.05$);采用线性回归分析土壤各保护机制有机碳组分与总有机碳含量之间的回归关系。

2 结果与分析

2.1 不同稳定机制土壤有机碳含量

由表2可知,大兴安岭重度火烧迹地经过人工恢复后土壤总有机碳含量为36.94~69.55 g/kg,显著高于天然恢复。恢复后林分上层土壤总有机碳含量高于下层,0~10 cm和10~20 cm土层人工恢复林分的土壤总有机碳含量分别是天然恢复的1.98倍和1.73倍。

经物理-化学联合分组后,土壤总有机碳的回收率达94.6%~103.2%,说明该分组方法可信度高。经植被恢复后,大兴安岭重度火烧迹地0~10 cm层土壤未保护有机碳、物理保护有机碳和生物化学保护有机碳组分的含量高于10~20 cm层,化学保护有机碳则显著低于10~20 cm层($P<0.05$)。人工恢复林分0~10 cm层土壤cPOM、fPOM和iPOM分别是10~20 cm层的2.21、2.13、2.49倍。天然恢复林分0~10 cm层土壤cPOM、fPOM和iPOM分别是10~20 cm层的1.95、1.37、2.77倍。

重度火烧迹地经过不同方式恢复后,不同稳定机制土壤有机碳含量有明显差异。人工恢复林分

土壤 cPOM、fPOM、iPOM、NHC-d_{silt+clay}、HC-μ_{silt+clay} 和 NHC-μ_{silt+clay} 含量均高于天然恢复的林分,分别是天然恢复的 1.79~1.99、1.00~1.55、4.64~5.23、1.38~1.60、1.19~1.54、1.67~1.98 倍,其中以物理保护有机碳差异最为显著。2 种恢复方式下土壤化学保护有机碳变化不显著。

2 种恢复方式下林分土壤有机碳组分均以粗颗粒保护有机碳含量最高,含量分别为 24.28~53.58 g/kg 和 13.74~26.80 g/kg。

2.2 不同稳定机制土壤有机碳库分配特征

由图 1 可知,重度火烧迹地经过不同方式恢复后,土壤未保护有机碳、物理保护有机碳、化学保护有机碳、生物化学保护有机碳、物理-化学保护有机碳和物理-生物化学保护有机碳含量占总有机碳的比例分别为 65.73%~78.00%、1.38%~5.54%、0.82%~3.24%、8.57%~14.61%、1.00%~3.23% 和 6.07%~11.81%。2 种恢复方式下,土壤未保护有机碳含量占总有机碳的比例最高,其次是生物化学保护有机碳组分,物理-化学保护有机碳组分含量占总有机碳的比例最低。

与天然恢复相比,人工恢复下土壤的物理保护有机碳含量占总有机碳的比例提高 2.80%~3.19%,增幅呈显著水平($P<0.05$),未保护有机碳含量比例有所提高但未达显著水平;其余 4 个组分含量均呈现不同程度的降低,除物理-生物化学保护有机碳组分外均达显著水平($P<0.05$)。

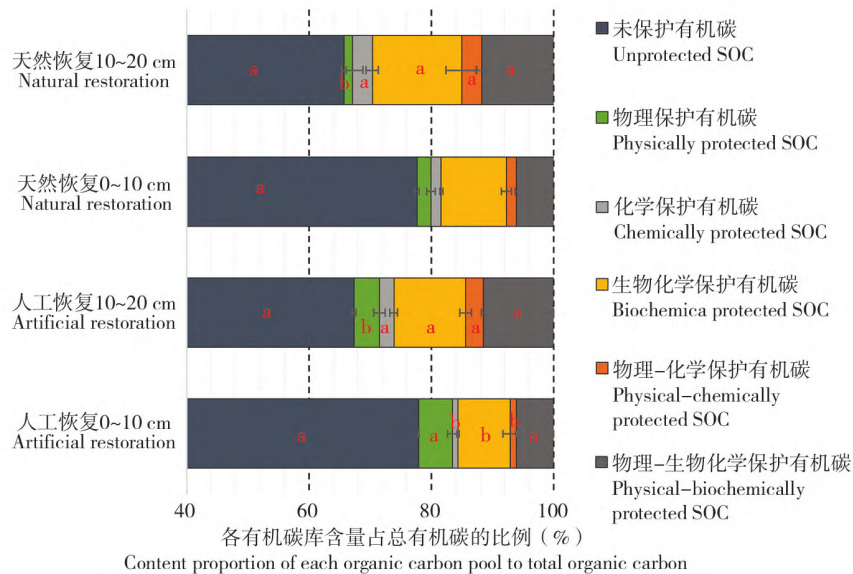
表 2 不同恢复方式下土壤有机碳含量

Tab. 2 Soil organic carbon contents under different restorations

土壤有机碳组分 Soil organic carbon component	土层/cm Soil layer	人工恢复/ (g·kg ⁻¹) Artificial restoration	天然恢复/ (g·kg ⁻¹) Natural restoration
TOC	0~10	69.55±0.69Aa	35.07±0.99Ab
	10~20	36.94±0.77Ba	21.37±0.51Bb
cPOM	0~10	53.58±0.34Aa	26.80±0.15Ab
	10~20	24.28±0.28Ba	13.74±0.67Bb
fPOM	0~10	0.64±0.03Aa	0.41±0.06Ab
	10~20	0.30±0.14Ba	0.30±0.03Ba
iPOM	0~10	3.86±0.57Aa	0.83±0.3Ab
	10~20	1.55±0.26Ba	0.30±0.03Bb
HC-d _{silt+clay}	0~10	0.57±0.15Ba	0.58±0.02Ba
	10~20	0.84±0.18Aa	0.69±0.11Aa
NHC-d _{silt+clay}	0~10	5.97±0.68Aa	3.73±0.09Ab
	10~20	4.34±0.37Ba	3.13±0.4Bb
HC-μ _{silt+clay}	0~10	0.69±0.01Ba	0.58±0.04Bb
	10~20	1.06±0.06Aa	0.69±0.09Ab
NHC-μ _{silt+clay}	0~10	4.23±0.46Aa	2.14±0.54Ab
	10~20	4.23±0.39Aa	2.53±0.08Ab

注:表中数据的表达形式为“均值±标准差”;大写字母代表相同恢复方式不同土层之间含量差异达显著水平,小写字母代表相同土层不同恢复方式之间含量差异达显著水平($P<0.05$)。

Note: The data in the table are expressed as “mean ± SD”. Capital letters indicate significant differences in soil contents in different soil layers with the same restoration method, and lowercase letters indicate significant differences in soil contents in different soil layers with different restoration methods in the same soil layer ($P<0.05$).



小写字母表示相同土层不同恢复方式之间比例差异达显著水平($P<0.05$)。

Lowercase letters represent significant difference in proportion among different restoration methods under the same soil layer($P<0.05$).

图 1 不同恢复方式下不同稳定机制土壤有机碳库含量占总有机碳的比例

Fig. 1 Content proportions of soil organic carbon pools with varying protection ways to TOC under different restoration modes

2.3 不同稳定机制土壤有机碳与总有机碳之间的关系

不同稳定机制的土壤有机碳组分与总有机碳含量之间的关系利用线性回归方程 $y = ax + b$ (式中: x 为土壤总有机碳含量; y 为土壤各保护态有机碳组分含量; a 、 b 分别为线性回归方程的斜率、截距。) 进行拟合, 结果见表 3。由表 3 可知, 除物理-化学保护有机碳和化学保护有机碳组分外, 其余各保护态有机碳组分与总有机碳含量之间均呈正相关关系。其中, 未保护有机碳、物理保护有机碳、物理-生物

化学保护有机碳和生物化学保护有机碳组分含量与总有机碳含量的相关性显著, 呈极显著水平 ($P < 0.001$)。线性回归方程的斜率表示各保护态有机碳组分含量随土壤总有机碳含量变化的变化量, 随总有机碳含量的增加, 游离粗颗粒有机碳组分含量的增加最为明显, 其次是物理保护有机碳组分。总有机碳含量每一单位 (g/kg) 的变化, 导致游离粗颗粒有机碳组分含量变化率达 82.4%。这表明, 土壤总有机碳含量的变化制约着土壤未保护有机碳组分含量的变化。

表 3 不同稳定机制土壤有机碳组分与总有机碳含量之间的相关关系 ($n = 36$)

Tab. 3 Correlations between the contents of soil organic carbon fraction and TOC under different protection methods ($n = 36$)

有机碳库 Organic carbon pool	组分 Fraction	线性回归方程 Linear regression equation	决定系数 (R^2) Coefficient of determination
未保护 Unprotected	cPOC	$y = 0.824x - 3.876$	0.989 ***
	fPOC	$y = 0.007x + 0.112$	0.621 ***
物理保护 Physically protected	iPOC	$y = 0.076x - 1.468$	0.914 ***
物理-化学保护 Physical-chemically protected	HC- $\mu_{\text{silt+clay}}$	$y = -0.001x + 0.779$	0.030
物理-生物化学保护 Physical-biochemically protected	NHC- $\mu_{\text{silt+clay}}$	$y = 0.036x + 1.834$	0.355 ***
化学保护 Chemically protected	HC- $d_{\text{silt+clay}}$	$y = -0.003x + 0.783$	0.070
生物化学保护 Biochemically protected	NHC- $d_{\text{silt+clay}}$	$y = 0.06x + 1.837$	0.798 ***

注: 线性回归方程形式为 $y = ax + b$; *** 分别表示在 $P < 0.001$ 上显著相关。

Note: The linear regression equation is of the form $y = ax + b$, *** represent significant correlation at $P < 0.001$, respectively.

3 讨论

土壤有机碳含量作为反映森林固碳能力的重要指标, 是由不同分解速率的碳组成的复合体^[19], 地上植物的枯枝落叶是森林土壤有机碳的主要来源之一。未保护有机碳即游离活性有机碳为颗粒有机碳。物理保护有机碳, 由于土壤团聚体的闭蓄性包裹导致的底物与酶的空间不可接近性, 从而形成物理保护^[20]。化学保护有机碳是指高价铁铝氧化物与黏土矿物由于分子交互作用如配位体位置交换、高价阳离子键桥和范德华力等导致的有机碳生物有效性降低^[21]。物理-化学保护有机碳同时受到闭蓄粉黏粒的化学保护和微团聚体的物理保护, 物理-生物化学保护有机碳受到来自闭蓄粉黏粒的生物化学和微团聚体的物理保护的双重保护^[22]。

本研究结果表明, 大兴安岭重度火烧迹地经过人工恢复后, 林分土壤有机碳含量及除化学保护有

机碳外的其他各有机碳组分的含量均显著高于天然恢复。不同恢复方式恢复后的林分类型不同, 其输入土壤的凋落物数量、根系生物量、分泌物和分解速率都不同, 导致土壤有机碳储量存在差异^[23]。Xiang 等^[24]、王瑞璋等^[25]研究表明, 森林生产力强、凋落物产量高会引起土壤总有机碳含量增加。Xiong 等^[26]也研究发现, 减少凋落物数量会导致土壤总有机碳含量的降低。吴晞等^[11]关于大兴安岭重度火烧迹地不同恢复年限的林分土壤研究表明, 人工恢复 29 a 的林分土壤有机碳含量显著高于其他恢复年限的林分。2 种恢复方式下的土壤总有机碳含量均随土层加深而显著降低, 说明研究区土壤有机碳具有“表聚作用”, 其垂直分布主要受植被类型的影响^[27]。土壤有机碳固存主要依赖凋落物和根层生物量分解^[28-29], 凋落物主要集中在土壤表层, 随深度的加深, 表层淋溶下移作用和地下植物碎屑分解作用减弱, 导致土壤有机碳含量呈现自上

而下降的趋势。根系的垂直分布格局也会影响输入土壤各个深度的土壤有机碳含量^[30]。

未保护有机碳主要来源于植物凋落物的分解、有机质的降解、土壤微生物本身及其代谢产物。本研究显示未保护有机碳和总有机碳之间存在显著的相关性,这是因为未保护有机碳的活性较高、周转时间较短、腐殖质化程度较低^[31],对土壤有机碳动态变化响应迅速^[32]。土壤总有机碳含量变化引起的游离粗颗粒有机碳含量的变化率为82.4%,说明游离粗颗粒有机碳对火烧迹地恢复后总有机碳的固存有重要贡献。未保护有机碳含量占总有机碳含量的比率,随深度的增加而减小,这与张茂增等^[19]、耿玉清等^[33]、杨君珑等^[34]研究结果一致。这可能是由于植物根系的垂直分布导致^[35],也与下层高含量的黏粉粒保护有机碳有关^[33]。

本研究表明物理保护有机碳含量与总有机碳含量呈显著的正相关关系,土壤固碳主要取决于团聚体对有机碳的物理保护作用^[36]。人工恢复显著增加土壤物理保护有机碳含量及其占总有机碳的比例,这与潘鹤^[37]在黑土土壤上的研究结果一致,这是因为在植被恢复过程中,土壤微生物活动增强、植物根系分泌物的增加等改善了土壤微环境^[38],促进了土壤微团聚体的形成并增强了土壤有机碳的物理保护作用。

人工恢复条件下,化学保护有机碳、生物化学保护有机碳、物理-化学保护有机碳和物理-生物化学保护有机碳组分占比均下降,这可能是由于人工林土壤中微生物的种类丰富、活性较强,黏粉粒结合碳在达到饱和后在真菌、外界环境等的作用下向颗粒有机碳转换^[22,37]。

综上,重度火烧迹地采取不同恢复方式,由于恢复过程中的树种组成、人为干扰程度的不同,导致土壤不同稳定机制有机碳组分在含量和特征上存在显著差异。因此,在进行火烧迹地植被恢复时,恢复方式的选择对土壤有机碳固存十分重要。

4 结论

大兴安岭重度火烧迹地植被恢复过程中,通过对不同恢复方式下土壤不同稳定机制有机碳组分特征研究发现,人工恢复后土壤总有机碳、未保护有机碳、物理保护有机碳、物理-化学保护有机碳、物理-生物化学保护有机碳和生物化学保护有机碳

含量均高于自然恢复。2种恢复方式下,土壤中都是未保护有机碳含量最高,其次是生物化学保护有机碳组分、物理-化学保护有机碳组分含量占总有机碳的比例最低。除物理-化学保护有机碳和化学保护有机碳组分外,其余保护态有机碳组分与总有机碳含量之间均呈极显著的正相关关系。大兴安岭重度火烧迹地经过人工恢复32 a后,不仅有利于土壤总有机碳的积累,还有利于土壤未保护有机碳的积累,可提供更多的生物有效碳。

【参 考 文 献】

- [1] BOSSIO D A, COOK-PATTON S C, ELLIS P W, et al. The role of soil carbon in natural climate solutions[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(5): 391-398.
- [2] DASS P, HOULTON B Z, WANG Y P, et al. Grasslands may be more reliable carbon sinks than forests in California [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(7): 074027.
- [3] BLASKO R, FORSMARK B, GUNDALE M J, et al. The carbon sequestration response of aboveground biomass and soils to nutrient enrichment in boreal forests depends on baseline site productivity[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 838(Pt 3): 156327.
- [4] AGGESTAM F, KONCZAL A, SOTIROV M, et al. Can nature conservation and wood production be reconciled in managed forests? A review of driving factors for integrated forest management in Europe[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 268: 110670.
- [5] LEHMANN J, HANSEL C M, KAISER C, et al. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity [J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(8): 529-534.
- [6] AMELUNG W, BOSSIO D, DE VRIES W, et al. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5427.
- [7] XU C, LIN T C, YANG Z J, et al. Forest conversion effects on soil organic carbon are regulated by soil aggregate stability and not by recalcitrance: evidence from a reforestation experiment[J]. *CATENA*, 2022, 219: 106613.
- [8] 董灵波,刘兆刚. 不同强度的林火干扰对天然落叶松林分物种多样性及碳储量的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2020, 48(9): 45-50.
DONG L B, LIU Z G. Effects of different fire intensities on biodiversity and carbon stocks of natural *Larix gmelinii* forest in Daxing'an mountains [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, 48(9): 45-50.
- [9] 白磊,李国辉,许行健,等. 土壤有效磷含量对滇中3种

- 常见草本植物燃烧性的影响[J]. 西部林业科学, 2023, 52(1): 122-129, 181.
- BAI L, LI G H, XU X J, et al. Effects of soil available phosphorus content on the combustibility of three common herbaceous plants in central Yunnan[J]. Journal of West China Forestry Science, 2023, 52(1): 122-129, 181.
- [10] 鄢亚微, 谢涛. 基于北斗卫星导航技术的森林火灾危险点自动预测方法[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(5): 88-91.
- QIE Y W, XIE T. Automatic prediction method of forest fire hazard points based on Beidou satellite navigation technology[J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(5): 88-91.
- [11] 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 Greater Xing'an Mountains[J]. Forest Engineering, 2022, 38(2): 8-13, 104.
- [12] 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 X, 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.
- [13] XIFRE-SALVADO M A, PRAT-GUITART N, FRANCO M, et al. Effects of fire on the organic and chemical properties of soil in a *Pinus halepensis* mill. forest in rocallaura, NE Spain [J]. Sustainability, 2021, 13(9): 5178.
- [14] HE J Y, CHEN D, JENKINS L, et al. Impacts of wild-fire and landscape factors on organic soil properties in Arctic tussock tundra[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(8): 085004.
- [15] 李红运, 辛颖, 赵雨森. 火烧迹地不同恢复方式土壤团聚体微生物量碳特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 342-347, 352.
- LI H Y, XIN Y, ZHAO Y S. Characteristics of microbial biomass carbon in soil aggregates of burned area under different restorations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 342-347, 352.
- [16] 李红运, 辛颖, 赵雨森. 火烧迹地不同恢复方式土壤有机碳分布特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2747-2753.
- LI H Y, XIN Y, ZHAO Y S. Distribution characteristics of soil organic carbon of burned area under different restorations[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2747-2753.
- [17] DUNGAIT J A J, HOPKINS D W, GREGORY A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance[J]. Global Change Biology, 2012, 18(6): 1781-1796.
- [18] STEWART C E, PLANTE A F, PAUSTIAN K, et al. Soil carbon saturation: linking concept and measurable carbon pools[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(2): 379-392.
- [19] 张茂增, 辛颖, 赵雨森. 火烧对大兴安岭樟子松天然林土壤有机碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 322-326.
- ZHANG M Z, XIN Y, ZHAO Y S. Impact of burning on soil organic carbon fractions in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* natural forest of Great Xing'an Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 322-326.
- [20] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 土壤有机碳分组方法概述[J]. 中国土壤与肥料, 2014(4): 1-6.
- ZHANG L M, XU M G, LOU Y L, et al. Soil organic carbon fractionation methods[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014(4): 1-6.
- [21] WHALEN J K, BOTTOMLEY P J, MYROLD D D. Carbon and nitrogen mineralization from light- and heavy-fraction additions to soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(10): 1345-1352.
- [22] 李文军, 黄庆海, 李大明, 等. 长期施肥下旱地红壤不同保护态有机碳库变化特征[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 106-115.
- LI W J, HUANG Q H, LI D M, et al. Variation characteristics of organic carbon pools with different protection methods in upland red soil under long-term fertilization [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(1): 106-115.
- [23] WIESMEIER M, URBANSKI L, HOBLEY E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales[J]. Geoderma, 2019, 333: 149-162.
- [24] XIANG H M, LUO X Z, ZHANG L L, et al. Forest succession accelerates soil carbon accumulation by increasing recalcitrant carbon stock in subtropical forest topsoils[J]. CATENA, 2022, 212: 106030.
- [25] 王瑞璋, 黎建强, 杨关吕, 等. 磨盘山典型森林生态系统土壤营养元素储量及其价值量评估[J]. 西部林业科学, 2019, 48(6): 93-99.
- WANG R Z, LI J Q, YANG G L, et al. Soil nutrient storage and its value assessment of typical forest ecosystems in the Mopan mountains[J]. Journal of West China

- Forestry Science, 2019, 48(6): 93-99.
- [26] XIONG Y M, XIA H P, LI Z A, et al. Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China[J]. Plant and Soil, 2008, 304(1/2): 179-188.
- [27] 和丽萍,李贵祥,孟广涛,等. 珠江源头区植被恢复过程中不同地带土壤有机碳和全氮分布特征[J]. 西部林业科学, 2020, 49(5): 23-29.
- HE L P, LI G X, MENG G T, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen of different restoration land in vegetation restoration process at the Pearl River headstream[J]. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(5): 23-29.
- [28] 王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 1075-1081.
- WANG Q K. Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 1075-1081.
- [29] WANG L F, CHEN Y M, ZHOU Y, et al. Litter chemical traits strongly drove the carbon fractions loss during decomposition across an alpine treeline ecotone[J]. Science of the Total Environment, 2021, 753: 142287.
- [30] 周莉,李保国,周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- ZHOU L, LI B G, ZHOU G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. Advance in Earth Sciences, 2005, 20(1): 99-105.
- [31] 王斐,马锐豪,夏开,等. 森林转换对土壤活性有机碳组分的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 233-240.
- WANG F, MA R H, XIA K, et al. Response of soil labile organic carbon fractions to forest conversions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 233-240.
- [32] 钱国平,赵志霞,李正才,等. 火烧对北亚热带天然次生林土壤有机碳的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(6): 115-119.
- QIAN G P, ZHAO Z X, LI Z C, et al. Effects of fire on soil organic carbon in natural secondary forest in north subtropical areas[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(6): 115-119.
- [33] 耿玉清,余新晓,岳永杰,等. 北京山地针叶林与阔叶林土壤活性有机碳库的研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 19-24.
- GENG Y Q, YU X X, YUE Y J, et al. Soil active organic carbon pool of coniferous and broadleaved forests in the mountainous area of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(5): 19-24.
- [34] 杨君珑,张学丽,曹兵,等. 宁夏罗山典型植被类型的土壤活性有机碳组分研究[J]. 西部林业科学, 2017, 46(4): 61-66.
- YANG J L, ZHANG X L, CAO B, et al. Active organic carbon in soil of typical vegetation in Luoshan of Ningxia[J]. Journal of West China Forestry Science, 2017, 46(4): 61-66.
- [35] HANNAM K D, QUIDEAU S A, -W OH S, et al. Forest floor composition in aspen- and spruce-dominated stands of the boreal mixedwood forest[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(5): 1735-1743.
- [36] 孙颖,徐嘉晖,高菲,等. 长白山森林土壤有机碳及其在团聚体密度组分中的分布[J]. 森林工程, 2018, 34(2): 1-5.
- SUN Y, XU J H, GAO F, et al. Organic carbon content and its distribution in aggregate-density fractions of forest soils in Changbai Mountain[J]. Forest Engineering, 2018, 34(2): 1-5.
- [37] 潘鹤. 人工植被恢复对黑土土壤有机质组分与氮素形态的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- PAN H. Effects of artificial vegetation restoration on soil organic matter fractions and nitrogen species in black soil[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [38] 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.