

采伐对大兴安岭落叶松-苔草沼泽土壤 有机碳储量的影响

卢慧翠, 牟长城*, 王彪, 包旭, 崔巍

(东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040)

摘要:对比分析了大兴安岭不同采伐强度(未采伐—对照、轻度择伐—25%、中度择伐—35%、强度择伐—50%)下落叶松-苔草沼泽土壤密度、土壤有机碳含量与土壤有机碳储量的变化,揭示了采伐干扰对森林湿地土壤有机碳储量的影响规律。结果表明:①中度择伐与强度择伐显著提高了其土壤密度,轻度择伐则对土壤密度无显著影响;②轻度择伐显著提高了其表层和深层土壤的有机碳含量,中度择伐与强度择伐显著降低了其各土壤层和中上部土壤层的有机碳含量;③轻度择伐显著提高了其深层土壤有机碳储量,中度择伐和强度择伐则分别显著降低了中下部和中部土壤层的有机碳储量;④轻度择伐样地土壤有机碳储量较对照提高了16.2% ($P > 0.05$),中度择伐和强度择伐样地土壤有机碳储量分别较对照降低了48.5%和30.1% ($P < 0.05$)。

关键词:大兴安岭;落叶松-苔草沼泽;土壤有机碳储量;采伐干扰

中图分类号:S714

文献标识码:A

Effects of Harvesting on Soil Organic Carbon Storage of Boreal *Larix gmelinii-Carex schmidtii* Wetlands in Daxing'anling

LU Hui-cui, MU Chang-cheng, WANG Biao, BAO Xu, CUI Wei

(Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: This paper compared the changes of soil bulk density, soil organic carbon concentration and soil organic carbon storage five years after harvesting with different intensities, i. e. unharvesting (the control), low-intensity selective cutting (25%), moderate-intensity selective cutting (35%) and heavy-intensity selective cutting (50%) and revealed the influence of harvesting intensity on soil organic carbon storage of *Larix gmelinii-Carex schmidtii* wetlands in Daxing'anling. The key results are as follows: (1) the soil bulk density did not differ significantly at the low-intensity selective cutting sites ($0.22 \pm 0.06 \sim 1.17 \pm 0.22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), and increased significantly at the moderate-intensity selective cutting ($0.55 \pm 0.23 \sim 1.58 \pm 0.07 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) and heavy-intensity selective cutting ($0.49 \pm 0.24 \sim 1.47 \pm 0.08 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) sites, compared with that at control ($0.31 \pm 0.09 \sim 1.18 \pm 0.13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) sites (28.0%~137.0% or 19.7%~98.1%) ($P < 0.05$); (2) the low-intensity selective cutting ($25.55 \pm 1.01 \sim 253.57 \pm 18.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) led to a significant increase of soil organic carbon concentration (53.8%~126.7%) in the surface and deep layer, however, the moderate-intensity selective cutting ($1.52 \pm 1.32 \sim 62.70 \pm 54.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and heavy-intensity selective cutting ($7.91 \pm 5.59 \sim 102.59 \pm 67.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) significantly reduced the soil organic carbon concentration in each layer (62.0%~89.0%) or the middle-upper part layer (37.8%~85.0%) ($P < 0.05$); (3) the low-intensity selective cutting ($2.90 \pm 0.51 \sim 5.69 \pm 1.55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) resulted in a

收稿日期:2012-08-28

基金项目:国家“十二五”农村领域科技计划课题森林湿地生态系统功能恢复及优化技术与示范(2011BAD08B02-04)

作者简介:卢慧翠(1987—),女,在读硕士研究生,主要研究方向:湿地生态学,E-mail:luhuicui@126.com

* 通讯作者:牟长城,教授.E-mail:mccnefu@yahoo.com

significant increase of soil organic carbon storage (90.7%~128.8%) in the deep layers, while moderate-intensity selective cutting ($0.25 \pm 0.12 \sim 4.65 \pm 3.52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) and heavy-intensity selective cutting ($1.14 \pm 0.79 \sim 4.42 \pm 1.64 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) declined significantly the soil organic carbon storage in the lower-middle part (76.4%~83.0%) or the middle part layer (56.8%) ($P < 0.05$); (4) harvesting caused a significant increase of soil organic carbon storage by 16.2% at the low-intensity selective cutting sites ($20.88 \pm 2.62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) or a significant decrease by 48.5% and 30.1% at the moderate-intensity selective cutting ($9.01 \pm 5.90 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) and heavy-intensity selective cutting ($12.22 \pm 4.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) sites, respectively, compared with the unharvested stand ($17.49 \pm 3.71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) ($P < 0.05$). Therefore, low-intensity selective cutting should be adopted to manage *Larix gmelinii* - *Carex schmidtii* wetlands from the carbon sequestration point of view.

Key words: Daxing'anling; *Larix gmelinii* - *Carex schmidtii* wetlands; soil organic carbon storage; harvesting

目前全球地表平均温度已上升(0.6 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$,其主要诱因是由于人类使用化石燃料和土地覆盖与利用的变化导致大气圈中 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等温室气体的浓度增加^[1]。如何有效经营管理好湿地与陆地生态系统,以便增加或维持其碳汇功能、减缓气候变化已是亟待解决的重大科学问题之一。

湿地因其具有巨大的土壤碳库、高甲烷排放和高固碳潜力(泥炭形成、沉积物堆积、植物生物量积累),使其成为全球碳动态的重要组成部分,例如,泥炭地仅占陆地表面的3%,却含有近1/3的全球土壤碳库(16%~33%)^[2]。因此,研究湿地碳循环过程具有重要意义。

目前有关湿地固碳机制方面研究表明:湿地土壤一般都是处于充分水饱和状态或经常位于水面以下,形成厌氧的土壤环境,微生物分解过程相对缓慢,能够存储 CO_2 并释放 CH_4 ,正因为其能够吸收大气中的 CO_2 并储存在其沉积物中,湿地可能成为温室气体的吸收汇^[2-3],同时天然湿地每年向大气中排放大约 $1.45 \times 10^{11} \text{ kg CH}_4\text{-C}$,占全球人为和自然甲烷排放总量的25%^[4],且甲烷较 CO_2 具有更高的全球变暖潜力(23倍),故湿地又被认为是温室气体的排放源^[5-6]。因此,湿地是碳的源/汇转换器,探索能够发挥其碳汇功能的经营管理措施尤为重要。

有关人为活动干扰对湿地碳汇的影响研究表明:全球历史上曾经有天然湿地面积(在1800年以前)约9.307亿 hm^2 ,因湿地排水造林和耕作发展农林业,目前全球湿地面积已减少至5.961亿 hm^2 (减少了36.0%),其土壤碳库估计值为513 Pg,固碳速率估计值为 $137 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,而过往损失湿地的碳氧化速率估计值为 $205 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,净碳平衡为 $-68 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[7]。可见人为活动干扰已经导致全球湿地向大气中的净碳排放。又如,在泥炭地集中分布的北

方和温带区域已有1500万 hm^2 泥炭地被排水造林,也导致了泥炭层减少及以 CO_2 形式的碳损失^[8]。证明对湿地不合理的开发与利用已经导致了严重后果,有必要探索科学的湿地利用途径。

目前国外有关采伐对森林湿地土壤碳储量的影响研究表明:皆伐5年后森林湿地土壤碳储量会降低^[9],皆伐11年后才恢复到采伐前的水平^[10];但也有学者认为皆伐5年后森林湿地土壤碳储量会增加^[11]。因此,采伐干扰对森林湿地土壤碳储量影响方面的研究还存有争议。我国有关采伐对森林湿地影响研究主要集中在温室气体排放方面^[12-13],而有关采伐对森林湿地土壤有机碳储量的影响研究尚未见报道。本文选择了大兴安岭地区典型的落叶松-苔草沼泽为研究对象,通过对比分析其在不同采伐强度(未采伐—对照、轻度择伐—25%、中度择伐—35%、强度择伐—50%)下的土壤密度、土壤有机碳含量与土壤有机碳储量的变化,揭示采伐干扰对森林湿地土壤有机碳储量的影响规律,以便为寒温带森林湿地可持续经营提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于黑龙江省大兴安岭东南部南瓮河自然保护区($51^{\circ}05' \sim 51^{\circ}39' \text{ N}$, $125^{\circ}07' \sim 125^{\circ}50' \text{ E}$)。该区总面积为 $2.30 \times 10^5 \text{ hm}^2$,平均海拔500~800 m,属低山丘陵地带,气候属于寒温带湿润气候,年平均气温 $-5^{\circ}\text{C} \sim -1^{\circ}\text{C}$,无霜期90~100 d,植物生长期为110 d左右,年降水量390~490 mm,主要集中在7—8月份,年均积雪日145 d以上。土壤类型以泥炭腐殖质沼泽土、泥炭土和草甸沼泽土为主,岩石风化作用较弱,土层浅薄。该区地带性植被类型为寒温性针叶林,主要的针叶乔木树种为兴安落叶松(*Larix gmelini* (Rupr.) Rupr.),

占总面积的65%以上,主要的阔叶乔木树种为白桦(*Betula platyphylla* Suk.)和山杨(*Populus davidiana* Dode),高海拔地带分布有偃松(*Pinus pumila* (Pall.) Regel)。湿地面积占60%以上,且沿水分环境梯度依次分布,形成森林湿地过渡带。

1.2 样地设置

2011年8月在过往建立的采伐试验地(即2006年秋季进行采伐试验,采伐方式为“茎干伐”,即只伐掉乔木层树干,林地内保留采伐剩余物)中选择相同海拔高度、地势平坦区域分别设置了落叶松-苔草

沼泽对照样地(未采伐样地)、轻度择伐样地(25%)、中度择伐样地(35%)和强度择伐样地(50%)各3块,样地面积均为20 m×30 m,共计设立12块标准地(表1)。试验地主要乔木树种为兴安落叶松和白桦,灌木层主要有油桦(*Betula ovalifolia* Rupr.)、笃斯越橘(*Vaccinium uliginosum* L.)和细叶杜香(*Ledum palustre* var. *angustum* N. Busch),草本层主要有鼓囊苔草(*Carex schmidtii* Meinh.)、白毛羊胡子草(*Eriophorum vaginatum* L.)和小叶樟(*Calamagrostis angustifolia* Kom.)。

表1 不同处理样地状况和乔木层特征

处理	样地面积/(m×m)	树种	密度/(株·hm ⁻²)	胸高断面积/(m ² ·hm ⁻²)	平均胸径/cm	胸径范围/cm
CK	20×30	兴安落叶松	1 751±210	26.1±4.6	12.5	4.8~27.7
		白桦	624±90	8.9±1.5	14.8	6.4~34.4
L	20×30	兴安落叶松	1 178±142	25.0±5.9	16.5	4.2~33.9
		白桦	518±53	3.3±0.5	11.0	5.2~18.8
M	20×30	兴安落叶松	1 119±98	18.9±4.8	13.3	5.1~34.9
		白桦	437±189	4.0±0.6	10.6	4.0~21.1
H	20×30	兴安落叶松	757±153	17.5±7.6	15.3	5.2~35.8
		白桦	268±62	1.3±0.2	8.9	5.0~13.1

CK: 对照;L: 轻度择伐;;M: 中度择伐;H: 强度择伐;下同。

1.3 样品采集与分析

在每块标准地随机挖出5个土壤剖面,每10 cm为一层取样,由于土层较浅,50 cm以下即为母质层,所以剖面深度取至50 cm为止。用土壤环刀(100 cm³)在每一土层中部取土样测定土壤密度;同时取约500 g土样装入样品袋,用于测定土壤有机碳含量。仔细去除土壤环刀内土样的植物根系和石砾,在105℃烘24 h后,称质量并计算土壤密度。样品袋内的土样自然风干后,取一部分土样过2 mm土壤筛,同时用4 mol·L⁻¹ HCl处理4 h后,在65℃烘16 h除去无机碳^[14],再用分析天平(0.1 mg)准确称量约0.500 0 g土样,利用Multi N/C 3100分析仪和H T 1300 Solid Module (Analytik Jena A G, Germany)测定土壤有机碳含量,并计算土壤有机碳储量^[15]。

1.4 数据处理

采用Excel 2003对数据进行处理。采用SPSS 11.5统计分析软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),应用最小显著差异法(LSD)对不同数据组间的差异进行显著性检验;显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 采伐对落叶松-苔草沼泽土壤密度的影响

由表2可以得到,采伐对大兴安岭落叶松-苔草沼泽土壤密度具有影响。其对照、轻度择伐、中度择伐、强度择伐样地各土壤层的密度依次分布在 $0.31 \pm 0.09 \sim 1.18 \pm 0.13$ 、 $0.22 \pm 0.06 \sim 1.17 \pm 0.22$ 、 $0.55 \pm 0.23 \sim 1.58 \pm 0.07$ 、 $0.49 \pm 0.24 \sim 1.47 \pm 0.08$ g·cm⁻³之间,其中,轻度择伐样地0~50 cm各土壤层的密度与对照样地相应土壤层虽有所增减(-29.0%~14.8%),但均未达到显著差异性水平;而中度择伐样地与强度择伐样地各土壤层的密度分别较对照样地相应土壤层提高了28.0%~137.0%和19.7%~98.1%,且中度择伐样地各土壤层及强度择伐样地除表层外的其他土壤层的密度与对照样地之间均存在着显著差异性($P < 0.05$)。因此,中度择伐与强度择伐显著提高了落叶松苔草-沼泽的土壤密度,而轻度择伐对其无显著影响。

采伐对其土壤密度的垂直分布格局也具有影响。对照样地土壤密度呈现出随土壤深度增加而递增的分布格局,其土壤密度分为4层,即0~10 cm、

10~20 cm、20~30 cm 和 30~50 cm,且这4个土壤层的密度存在着显著差异性($P < 0.05$);轻度择伐样地与中度择伐样地土壤密度也呈现出随土壤深度增加而递增的分布格局,但其土壤密度仅分3层,即0~10 cm、10~20 cm、20~50 cm,且这3个土壤层的密度也存在着显著差异性($P < 0.05$);而强度择伐样地土壤密度仅分2层,土壤表层(0~10

cm)相对较低,10~50 cm 土壤层相对较高,土壤表层密度与其他土壤层存在着显著差异性($P < 0.05$),其他土壤层之间差异一般不显著(除10~20 cm 与40~50 cm 土壤层存在显著差异性外)。可见,采伐改变了落叶松-苔草沼泽土壤密度的垂直分布格局。

表2 落叶松-苔草沼泽土壤密度垂直分布特征

 $g \cdot cm^{-3}$

土层/cm	处理			
	CK	L	M	H
0~10	0.31(0.09)ACa	0.22(0.06)Aa	0.55(0.23)Ba	0.49(0.24)BCa
10~20	0.54(0.18)Ab	0.62(0.24)Ab	1.28(0.35)Bb	1.07(0.45)Bb
20~30	0.99(0.13)Ac	0.95(0.22)Ac	1.51(0.16)Bc	1.29(0.32)Bbc
30~40	1.17(0.11)Ad	1.01(0.25)Ac	1.58(0.07)Bc	1.40(0.17)Bbc
40~50	1.18(0.13)Ad	1.17(0.22)Ac	1.51(0.09)Bc	1.47(0.08)Bc

注:括号内数值为标准差;不同大写字母表示不同处理土壤密度差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示不同土层土壤密度差异显著($P < 0.05$)。

2.2 采伐对落叶松-苔草沼泽土壤有机碳含量的影响

由表3可以看出,采伐对大兴安岭落叶松-苔草沼泽土壤有机碳含量具有较大的影响。对照、轻度择伐、中度择伐、强度择伐样地各土壤层的有机碳含量依次分布在 $11.27 \pm 5.82 \sim 164.86 \pm 41.34$ 、 $25.55 \pm 1.01 \sim 253.57 \pm 18.89$ 、 $1.52 \pm 1.32 \sim 62.70 \pm 54.33$ 、 $7.91 \pm 5.59 \sim 102.59 \pm 67.49 g \cdot kg^{-1}$ 之间,其中,轻度择伐样地0~10 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 土壤层的有机碳含量依次较对照提高了53.8%、31.8%、113.6%、126.7%,而10~20 cm 土壤层却较对照降低了34.8%,但仅有0~10 cm、30~40 cm、40~50 cm 土壤层与对照

之间存在着显著差异性($P < 0.05$);中度择伐样地0~50 cm 各土壤层的有机碳含量依次较对照样地降低了62.0%、73.2%、86.5%、89.0%、86.3%,且各土壤层的有机碳含量与对照之间均存在着显著差异性($P < 0.05$);强度择伐样地各土壤层的有机碳含量依次较对照样地降低了37.8%、85.0%、48.6%、23.3%、29.8%,但仅0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 土壤层的有机碳含量与对照之间存在着显著差异性($P < 0.05$)。因此,轻度择伐显著提高了落叶松-苔草沼泽表层和深层土壤的有机碳含量,中度择伐显著降低了各土壤层的有机碳含量,强度择伐则显著降低了中上部土壤层的有机碳含量。

表3 落叶松-苔草沼泽土壤有机碳含量垂直分布特征

 $g \cdot kg^{-1}$

土层/cm	处理			
	CK	L	M	H
0~10	164.86(41.34)Aa	253.57(18.89)Ba	62.70(54.33)Ca	102.59(67.49)Ca
10~20	137.38(50.28)Aa	89.56(66.83)ABb	36.84(33.57)Bab	20.67(6.79)Bb
20~30	34.05(15.64)Ab	44.87(20.86)Ac	4.61(3.41)Bbc	17.51(16.72)Bbc
30~40	13.85(6.55)Ab	29.59(3.08)Bc	1.52(1.32)Cc	10.62(9.12)Abc
40~50	11.27(5.82)Ab	25.55(1.01)Bc	1.54(0.73)Cc	7.91(5.59)Ac

注:括号内数值为标准差;不同大写字母表示不同处理土壤有机碳含量差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示不同土层土壤有机碳含量差异显著($P < 0.05$)。

采伐对其土壤有机碳含量垂直分布格局也具有影响。对照、轻度择伐、中度择伐、强度择伐样地土壤有机碳含量均呈现出随土壤深度增加而递减的分

布格局,但对照样地土壤有机碳含量分为2层,即0~20 cm 土壤层相对较高,20~50 cm 土壤层相对较低,且这2个土壤层间存在着显著差异性($P <$

0.05);轻度择伐样地土壤有机碳含量分为3层,即0~10 cm土壤层最高、10~20 cm土壤层居中、20~50 cm土壤层最低,且这3个土壤层之间存在着显著差异性($P < 0.05$);中度择伐样地土壤有机碳含量分为3层,即0~10 cm土壤层最高、10~20 cm土壤层居中、20~50 cm土壤层最低,但10~20 cm土壤层为0~10 cm及20~30 cm土壤层之间的过渡层,与两者均无显著差异性($P < 0.05$);强度择伐样地土壤有机碳含量也分为2层,但土壤表层(0~10 cm)相对较高,10~50 cm土壤层相对较低,且土壤表层与中下部土壤层之间均存在着显著差异性($P < 0.05$),其他土壤层之间一般差异性不显著(除10~20 cm与40~50 cm土壤层存在显著

差异性外)。可见,采伐改变了其土壤有机碳含量的垂直分布格局。

2.3 采伐对落叶松-苔草沼泽土壤有机碳含量与土壤密度关系的影响

由图1得到,不同处理样地土壤有机碳含量与土壤密度均具有显著的负相关关系,而且对照($R^2 = 0.8328, P < 0.0001$)、轻度择伐($R^2 = 0.8829, P < 0.0001$)和强度择伐样地($R^2 = 0.8190, P < 0.0001$)的土壤有机碳含量与土壤密度的相关关系较中度择伐样地($R^2 = 0.4437, P < 0.0001$)高。由此可见,采伐改变了土壤有机碳含量与土壤密度的相关程度。

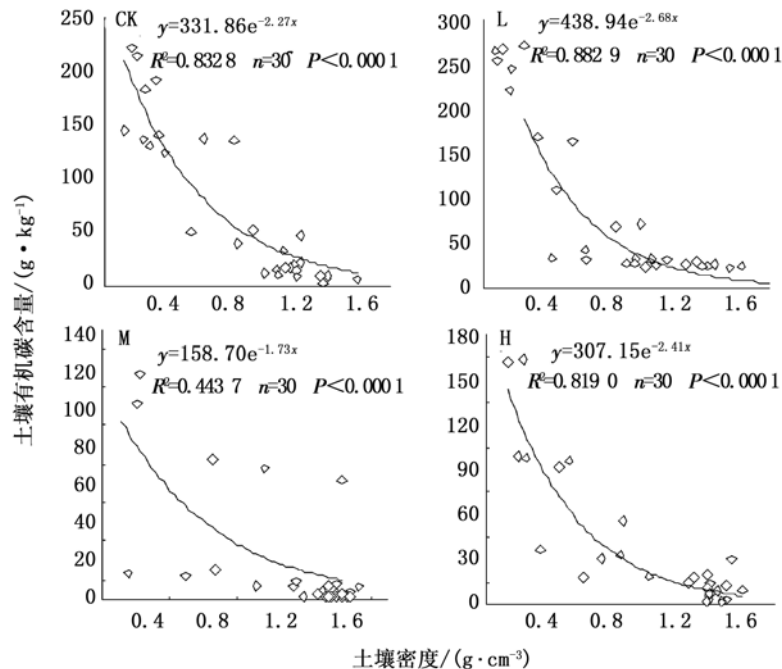


图1 落叶松-苔草沼泽土壤有机碳含量与土壤密度的关系

2.4 采伐对落叶松-苔草沼泽土壤有机碳储量的影响

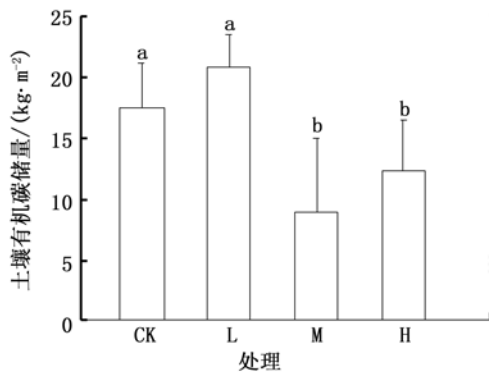
由图2可以看出,采伐对大兴安岭落叶松-苔草沼泽土壤有机碳储量具有较大影响。对照、轻度择伐、中度择伐、强度择伐样地土壤有机碳储量依次为 17.49 ± 3.71 、 20.88 ± 2.62 、 9.01 ± 5.90 、 $12.22 \pm 4.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,轻度择伐样地土壤有机碳储量较对照样地提高了16.2%,中度择伐和强度择伐样地则分别较对照样地降低了48.5%和30.1%,且后两者均与对照样地之间存在显著差异性($P < 0.05$)。因此,轻度择伐虽提高了落叶松-苔草沼泽土壤有机碳

储量,但影响未达到显著水平,中度择伐和强度择伐则显著降低了其土壤有机碳储量。

由图3可以看出,采伐对各土壤层有机碳储量影响不同。对照、轻度择伐、中度择伐、强度择伐样地各土壤层的有机碳储量依次分布在 $4.68 \pm 1.05 \sim 6.67 \pm 2.70$ 、 $2.90 \pm 0.51 \sim 5.69 \pm 1.55$ 、 $0.25 \pm 0.12 \sim 4.65 \pm 3.52$ 、 $1.14 \pm 0.79 \sim 4.42 \pm 1.64 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,轻度择伐样地0~10 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm各土壤层的有机碳储量依次较对照样地提高了21.5%、38.9%、90.7%、128.8%,而10~20 cm土壤层较对照样地降低了29.1%,仅

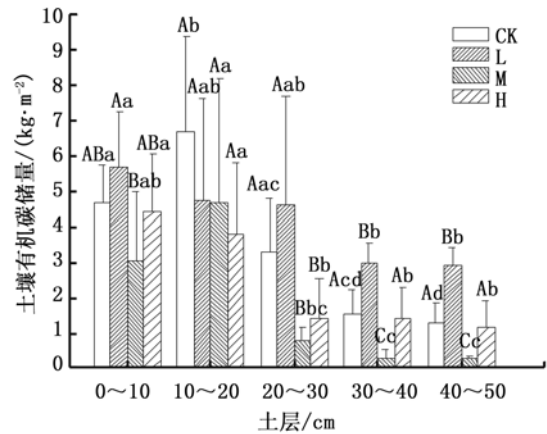
有 30~50 cm 各土壤层的有机碳储量与对照样地存在显著差异性 ($P < 0.05$); 中度择伐样地 0~50 cm 各土壤层的有机碳储量依次较对照样地降低了 34.5%、30.1%、76.4%、83.0%、80.4%, 但仅有 20~50 cm 各土壤层有机碳储量与对照样地存在着显著差异性 ($P < 0.05$); 强度择伐样地 0~50 cm 各土壤层的有机碳储量依次较对照样地降低了 5.4%、42.9%、56.8%、8.5%、10.0%, 但仅有 20~30 cm 土壤层有机碳储量与对照样地存在着显著差异性 ($P < 0.05$)。因此, 轻度择伐显著提高了落叶松-苔草沼泽深层土壤有机碳储量, 中度择伐显著降低了中下部土壤层有机碳储量, 强度择伐显著降低了中部土壤层有机碳储量。

采伐对土壤有机碳储量垂直分布格局也具有影响。总体来说, 对照、轻度择伐、中度择伐、强度择伐样地土壤有机碳储量随土壤深度增加而递减, 但对照样地土壤有机碳储量分为 4 层, 即 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~50 cm, 且这 4 个土壤层的有机碳储量存在着显著差异性 (除 0~10 cm 与 20~30 cm, 20~30 cm 与 30~40 cm 土壤层无显著差异性外); 轻度择伐样地土壤有机碳储量分为 3 层, 即 0~10 cm 土壤层最高、10~30 cm 土壤层居中、30~50 cm 土壤层最低, 且土壤表层与下部土壤层之间存在着显著差异性 ($P < 0.05$); 中度择伐样地土壤有机碳储量分为 2 层, 即 0~20 cm 土壤层相对较高, 20~50 cm 土壤层相对较低, 且这 2 个土壤层间存在着显著差异性; 强度择伐样地土壤有机碳储量也分为 2 层, 0~20 cm 土壤层相对较高, 20~50 cm 土壤层相对较低, 且这 2 个土壤层间存在着显著差异性 ($P < 0.05$)。可见, 采伐改变了土壤有机碳储量的垂直分布格局。



不同小写字母表示不同处理土壤有机碳储量差异显著 ($P < 0.05$), 图中误差线表示该数值的标准偏差 (SD), $n = 45$ 。

图2 落叶松-苔草沼泽土壤有机碳储量



不同大写字母表示不同处理土壤有机碳储量差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同土壤深度土壤有机碳储量差异显著 ($P < 0.05$), 图中误差线表示该数值的标准偏差 (SD), $n = 45$ 。

图3 落叶松-苔草沼泽土壤有机碳储量垂直分布

3 讨论

3.1 采伐对落叶松-苔草沼泽土壤密度的影响

采伐对大兴安岭落叶松-苔草沼泽土壤密度的影响与采伐强度有关, 中度择伐和强度择伐显著提高了土壤密度, 而轻度择伐对土壤密度影响不显著。这与 Laiho 等^[11]得出的森林湿地皆伐 5 年后土壤密度无显著变化的研究结论并不一致, 但与 Martiarena 等^[16]得出的森林土壤密度随着采伐强度增强而增大的研究结论基本一致。分析其原因, 可能主要是由于择伐后林内空气温度与土壤温度有所提高及水位有所降低^[12], 加速了微生物的分解及养分循环过程^[17], 导致土壤有机碳含量减少, 土壤密度随之提高; 此外, 择伐后凋落物层的减少, 使土壤层受雨水侵蚀及淋溶过程增强^[18]及采伐过程对林地土壤产生的压实作用^[19]在某种程度上也可能使其土壤密度有所提高。

3.2 采伐对落叶松-苔草沼泽土壤有机碳含量的影响

采伐对落叶松-苔草沼泽各土壤层有机碳含量的影响规律不同。轻度择伐显著提高了表层和深层土壤的有机碳含量, 中度择伐显著降低了各土壤层的有机碳含量, 强度择伐显著降低了中上部土壤层的有机碳含量。其中, 轻度择伐使森林湿地土壤表层有机碳含量显著增加, 与 Johnson 等^[20]得出的采伐导致森林土壤表层碳含量增加的结论相一致。这可能是由于天然针叶林地表凋落物中 C/N 较高, 分

解速率及矿化速率较低^[21],适当强度采伐后水热条件有利于地表凋落物和采伐剩余物的分解及有机质的矿化作用^[22],从而提高了表层土壤有机碳含量,还有学者认为采伐后林下植物群落的变化以及根际水位的存在也有利于森林湿地土壤表层碳含量的增加^[10];此外,采伐后大量死根的分解和凋落物中的有机质向下淋溶^[23]及根系周转和根系分泌物来源的碳可以直接向下部土壤层输入^[24]可能是导致轻度择伐样地深层土壤有机碳含量增加的主要原因。同时也证明了择伐对北方森林湿地土壤有机碳含量的影响规律与其对北方森林土壤碳含量的影响规律基本类似,仅是降低的幅度略低。

中度择伐和强度择伐显著降低了森林湿地土壤的有机碳含量,与 Mclaughlin 等^[25]得出的森林湿地皆伐5年后土壤有机碳含量降低的研究结论相一致。其原因可能包括以下3个方面,一是较大强度的采伐进一步提高了土壤温度及降低了水位,加速了土壤中活性有机碳分解消耗,导致向大气中释放更多的 CO₂,结果降低了各土壤层的有机碳含量^[26];二是较大强度采伐使凋落物输入量明显减少,导致土壤碳的补充速率降低^[27];三是较大强度采伐使林地有机物矿化释放的可溶性有机碳遭受淋溶和地表冲刷^[22],也可能导致土壤有机碳含量的降低。至于中度择伐显著降低了其各土壤层的有机碳含量和强度择伐仅显著降低了其中上部土壤层的有机碳含量,可能与两者对水位的影响程度有关,后者由于采伐强度相对较大,树木蒸腾作用受到强烈抑制,水位降低幅度不及前者,下部土壤水分含量过多,能够抑制有机碳的矿化并促进其累积^[28],结果导致两者对土壤有机碳含量的影响程度有所不同。

3.3 采伐对落叶松-苔草沼泽土壤有机碳储量的影响

采伐对落叶松-苔草沼泽土壤有机碳储量影响也与采伐强度有关。轻度择伐提高了其土壤有机碳储量,中度择伐和强度择伐显著降低了土壤有机碳储量。其主要影响机制为轻度择伐显著提高了深层土壤有机碳储量,中度择伐显著降低了中下部土壤层有机碳储量,强度择伐显著降低了中部土壤层有机碳储量。这与 Nilsen 等^[29]得到采伐对森林土壤碳储量的影响规律“即轻度择伐提高了森林土壤碳储量,而中度择伐和强度择伐降低了森林土壤碳储量”相一致,说明采伐对森林湿地土壤有机碳储量影响规律与采伐对森林土壤有机碳储量的影响规律相

同;而中、强度择伐显著降低了森林湿地土壤有机碳储量与 Trettin 等^[9]得到的皆伐5年后森林湿地土壤有机碳储量下降的研究结论相类似,说明中、强度择伐与皆伐对森林湿地土壤有机碳储量影响程度相近。

4 结论

(1)采伐对大兴安岭落叶松-苔草沼泽土壤密度的影响规律为轻度择伐无显著影响,中度择伐和强度择伐则显著地提高了土壤密度(28.0%~137.0%和19.7%~98.1%),且中度择伐较强度择伐提高幅度略大。

(2)采伐对大兴安岭落叶松-苔草沼泽土壤有机碳含量影响规律为轻度择伐显著提高了土壤表层和深层(0~10 cm和30~50 cm)的有机碳含量(53.8%~126.7%),中度择伐显著降低了各土壤层(0~50 cm)的有机碳含量(62.0%~89.0%),强度择伐则显著降低了中上部土壤层(0~30 cm)的有机碳含量(37.8%~85.0%)。

(3)采伐对大兴安岭落叶松-苔草沼泽土壤有机碳储量具有重要影响。未采伐样地的土壤有机碳储量为 17.49 kg·m⁻²,轻度择伐使其提高了16.2%,中度择伐和强度择伐则分别使其降低了48.5%和30.1%,且后两者均与未采伐样地之间存在显著差异性。这说明采伐后短期内,轻度择伐提高了土壤有机碳储量,中度择伐和强度择伐则使其明显降低。因此,从维持或提高森林湿地土壤碳汇考虑,选择轻度择伐经营方式比较适宜。

参考文献:

- [1] Houghton J T, Maccarthy J J, Metz B, *et al.* Climate Change 2001: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Impacts, Adaption, and Vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [2] Maltby E, Immirzi P. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils regional and global perspectives[J]. Chemosphere, 1993, 27(6): 999-1023
- [3] Alongi D M, Trott L A, Pfitzner J. Deposition, mineralization, and storage of carbon and nitrogen in sediments of the far northern and northern Great Barrier Reef shelf[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(20): 2595-2622
- [4] Whalen S C. Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere[J]. Environmental Engineering Science, 2005, 22(1): 73-94
- [5] Carroll P, Crill P. Carbon balance of a temperate poor fen[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1997, 11(3): 349-356

- [6] Wagner G H, Wolf D C. Carbon transformations and soil organic matter formation. Principles and Applications of Soil Microbiology [M]. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999
- [7] Bridgman S D, Megonigal J P, Keller J K, *et al.* The carbon balance of North American wetlands[J]. *Wetlands*, 2006, 26(4): 889-916
- [8] Kaunisto S. Peatland forestry in Finland: problems and possibilities from the nutritional point of view. Northern forested wetlands: Ecology and management[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997
- [9] Trettin C C, Gale M R, Jurgensen M F, *et al.* Carbon storage response to harvesting and site preparation in a forested mire in northern Michigan, USA[J]. *Suo*, 1992, 43(4-5): 281-284
- [10] Trettin C C, Jurgensen M F, Gale M R, *et al.* Recovery of carbon and nutrient pools in a northern forested wetland 11 years after harvesting and site preparation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(9): 1826-1833
- [11] Laiho R, Sanchez F, Tiarks A, *et al.* Impacts of intensive forestry on early rotation trends in site carbon pools in the southeastern US [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 174(1-3): 177-189
- [12] 牟长城, 吴云霞, 李婉妹, 等. 采伐对小兴安岭落叶松-泥炭藓沼泽温室气体排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 287-293
- [13] 孙晓新, 牟长城, 宋长春, 等. 采伐对小兴安岭森林沼泽甲烷通量的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1): 190-194
- [14] Carter M R. Soil Sampling and Methods of Analysis[M]. Boca Raton: CRC Press, 1993
- [15] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 83-90
- [16] Martiarena R A, Frangi J L, Pinazo M A, *et al.* Effect of thinning and harvest type on storage and losses of phosphorous in *Pinus taeda* L. Plantations in Subtropical Argentina[J]. *International Journal of Forestry Research*, 2011, 76: 15-32
- [17] Fisher R F, Binkley D, Pritchett W L. Ecology and Management of Forest Soils[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000
- [18] Garten C T, Post W M, Hanson P J, *et al.* Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 45(2): 115-145
- [19] Bouwman L A, Arts W. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 14(3): 213-222
- [20] Johnson D W. Effects of forest management on soil carbon storage [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1992, 64(1): 83-120
- [21] Trettin C C. Silvicultural effects on functional processes of a boreal wetland[D]. Raleigh: North Carolina State University, 1992
- [22] Yanai R D, Currie W S, Goodale C L. Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered [J]. *Ecosystems*, 2003, 6(3): 197-212
- [23] Ryan D F, Huntington T G, Wayne Martin C. Redistribution of soil nitrogen, carbon and organic matter by mechanical disturbance during whole-tree harvesting in northern hardwoods[J]. *Forest Ecology and Management*, 1992, 49(1-2): 87-99
- [24] Hendrick R L, Pregitzer K S. Temporal and depth-related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forests[J]. *Journal of Ecology*, 1996, 84(2): 167-176
- [25] Mclaughlin J W. Carbon assessment in Boreal Wetlands of Ontario [M]. Canada: Ontario Forest Research Institute, 2004
- [26] Jiang H, Apps M J, Peng C, *et al.* Modelling the influence of harvesting on Chinese boreal forest carbon dynamics[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1-2): 65-82
- [27] Powers R F, Frazer D W, Mccoll J G. Soil nitrogen mineralization in a clearcutting chronosequence in a northern California conifer forest[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(4): 1145-1152
- [28] De Neve S, Hofman G. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(5-6): 544-549
- [29] Nilsen P, Strand L T. Thinning intensity effects on carbon and nitrogen stores and fluxes in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand after 33 years[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3): 201-208