

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20140040

## 透光抚育对长白山“栽针保阔”红松林土壤碳储量影响

张晓亮<sup>1,2</sup> 牟长城<sup>1</sup> 张小单<sup>1</sup> 韩阳瑞<sup>1</sup> 庄宸<sup>1</sup> 曹万亮<sup>3</sup> 程家友<sup>4</sup> 郑瞳<sup>1</sup>

(1 东北林业大学生态研究中心 2 江西省水土保持科学研究院 3 吉林省敦化林业局 4 吉林省白河林业局)

**摘要:**运用采伐试验方法,研究上层透光抚育(对照为栽针未采伐、轻度透光抚育(25%)、中度透光抚育(50%)、强度透光抚育(75%)、全透光(100%)),透光抚育强度是指蓄积比例)对长白山中期(33年生)“栽针保阔”红松林土壤碳储量及凋落物碳储量的影响。结果表明:透光抚育对长白山中期“栽针保阔”红松林的土壤密度( $(0.83 \pm 0.02) \sim (1.15 \pm 0.03) \text{ g/cm}^3$ )与土壤碳含量( $(43.36 \pm 1.60) \sim (70.26 \pm 1.94) \text{ g/kg}$ )具有影响。中度透光抚育显著降低了其土壤密度(8.4%,  $P < 0.05$ ),但显著提高了其土壤碳含量(14.9%,  $P < 0.05$ );强度透光抚育与全透光显著提高了土壤密度(23.3%和27.1%,  $P < 0.05$ ),但也显著降低了土壤碳含量(23.7%和29.1%,  $P < 0.05$ );而轻度透光抚育对土壤密度与土壤碳含量均无显著影响。透光抚育对长白山中期“栽针保阔”红松林的土壤碳储量( $(13.12 \pm 1.57) \sim (23.46 \pm 2.03) \text{ kg/m}^2$ )产生了较大的影响;其中,中度透光抚育使其土壤碳储量显著提高了12.8% ( $P < 0.05$ ),强度透光抚育与全透光使其显著降低了29.9%和36.9% ( $P < 0.05$ ),而轻度透光抚育对其并无显著影响。透光抚育对于其凋落物碳储量( $(2.13 \pm 0.39) \sim (2.82 \pm 0.37) \text{ t/hm}^2$ )的影响相对较大;轻、中度透光抚育较对照提高了8.1%和19.5%,但仅有中度透光抚育提高显著( $P < 0.05$ ),强度透光抚育与全透光样地较对照样地降低了3.8%和9.8%,仅有全透光降低显著( $P < 0.05$ )。因此,中度透光抚育能够提高中期“栽针保阔”红松林的土壤碳储量及凋落物碳储量,强度透光抚育与全透光则会降低其土壤碳储量(皆伐也会降低其凋落物碳储量),故从维持或提高“栽针保阔”红松林土壤碳储量考虑,采取中低度透光抚育方式比较适宜。

**关键词:**长白山;“栽针保阔”红松林;土壤碳储量;透光抚育影响

中图分类号:S718.55<sup>+</sup>4.1; S791.247 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2015)10-0022-09

ZHANG Xiao-liang<sup>1,2</sup>; MU Chang-cheng<sup>1</sup>; ZHANG Xiao-dan<sup>1</sup>; HAN Yang-rui<sup>1</sup>; ZHUANG Chen<sup>1</sup>; CAO Wan-liang<sup>3</sup>; CHENG Jia-you<sup>4</sup>; ZHENG Tong<sup>1</sup>. **Effect of liberation cutting on the soil carbon storage of a Korean pine forest restored by planting conifers and reserving broad-leaved trees in Changbai Mountains of China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015)37(10) 22-30 [Ch,43ref.]

1 Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150040, P. R. China;

2 Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang, Jiangxi, 330029, P. R. China;

3 Dunhua Forestry Bureau, Jilin Province, 133700 P. R. China;

4 Baihe Forestry Bureau, Jilin Province, 133613, P. R. China.

We studied the effect of liberation cutting on the soil carbon storage and the litter carbon storage of a mid-term (33-year-old) Korean pine forest which was restored by planting conifers and reserving broad-leaved trees by using crown thinning control test method in Changbai Mountains of China. Five levels of cutting intensity were applied, namely, non-cutting (control), mild liberation cutting (25%), moderate liberation cutting (50%), heavy liberation cutting (75%), and clear cutting (100%) (cutting intensity refers to volume percentage). The main research results were as follows. The liberation cutting had certain effects on the soil bulk density ( $(0.83 \pm 0.02) - (1.15 \pm 0.03) \text{ g/cm}^3$ ) and the soil carbon

收稿日期:2014-02-27 修回日期:2015-05-10

基金项目:“十二五”国家农村领域科技支撑计划课题(2012BAD21B0202-03)。

第一作者:张晓亮。主要研究方向:森林生态学。Email:zhangxiaoliang1987@yeah.net 地址:330029 江西省南昌市青山湖南大道290号江西省水土保持科学研究院。

责任作者:牟长城,教授,博士生导师。主要研究方向:森林生态学。Email:mccnefu@yahoo.com 地址:150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路26号东北林业大学生态研究中心。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

concentration ( $(43.36 \pm 1.60) - (70.26 \pm 1.94)$  g/kg) of the Korean pine forest. Compared to the control, moderate liberation cutting decreased the soil bulk density by 8.4% ( $P < 0.05$ ), but increased the soil carbon concentration by 14.9% ( $P < 0.05$ ). Heavy liberation cutting and clear cutting increased the soil bulk density by 23.3% and 27.1% ( $P < 0.05$ ), and degraded the soil carbon concentration by 23.7% and 29.1%, respectively ( $P < 0.05$ ). Mild liberation cutting had no significant effect on the two parameters. The liberation cutting had great effect on the soil carbon storage ( $(13.12 \pm 1.57) - (23.46 \pm 2.03)$  kg/m<sup>2</sup>) of the Korean pine forest. Compared to the control, moderate liberation cutting led to the increase of soil carbon storage by 12.8% ( $P < 0.05$ ), while heavy liberation cutting and clear cutting lowered it by 29.9% and 36.9%, respectively ( $P < 0.05$ ). Mild liberation cutting had no significant effect on it. The liberation cutting had remarkable effect on the litter carbon storage ( $(2.13 \pm 0.39) - (2.82 \pm 0.37)$  t/ha) of the Korean pine forest. Moderate liberation cutting resulted in the increase of the litter carbon storage by 19.5% ( $P < 0.05$ ) compared to the control, while clear cutting reduced it by 9.8% ( $P < 0.05$ ). In summary, moderate liberation cutting could increase the soil carbon storage and litter carbon storage of the mid-term Korean pine forest in Changbai Mountains, while heavy liberation cutting and clear cutting would lead to soil carbon storage reducing (the latter also results in the reduction of litter carbon storage). Therefore, mild and moderate liberation cutting should be adopted to maintain or improve the soil carbon sinks for the Korean pine forests.

**Key words** Changbai Mountains; Korean pine forest by planting conifers and reserving broad-leaved trees; soil carbon storage; liberation cutting

土壤碳库储存量高达 1 500 Gt,是大气碳库的 2 倍,陆地生物量的 2.5 倍<sup>[1]</sup>,在保持全球碳循环平衡中起着至关重要的作用。而森林土壤碳储量约占全球土壤碳库的 73%<sup>[2-3]</sup>,不仅在森林生态系统碳循环中起着极其重要的作用<sup>[4]</sup>,还影响森林生产力<sup>[5-6]</sup>。因此,森林土壤碳的累积与分解过程的变化将会对生态系统碳平衡造成直接影响<sup>[7]</sup>。为了使森林生态系统能够保有及固定更多的碳,也为了削缓气候变化,应着力探索有效森林经营管理模式<sup>[8]</sup>。

采伐是森林经营管理实践中的主要干扰方式之一,但目前国内外学者关于采伐对森林土壤碳储量影响的结论并不一致,部分学者认为采伐会降低土壤碳储量<sup>[7,9-11]</sup>,也有学者认为采伐对中长期林地土壤碳储量没有显著影响<sup>[12-14]</sup>,还有学者认为采伐短期内能够增加土壤碳储量<sup>[15-19]</sup>。但这些研究多集中在采伐对单层人工纯林土壤碳储量的影响,而在采伐对复层天然混交林土壤碳储量影响方面的研究甚少,对其尚缺乏足够的认识。

我国地带性顶级植被阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林主要分布东北东部山地<sup>[20]</sup>,该植被类型具有生产力高、生态效益显著、稳定性强等诸多优点<sup>[21-23]</sup>。同时该区域也曾是我国重要的木材生产基地(木材产量曾一度占全国木材年产量的 1/2 以上)。20 世纪 80 年代前,由于过度开发及不合理利用,导致该区域的原始红松林逐步退化成次生林和人工纯林,该区域的森林生产力、生态系统功能遭受

极大破坏及大幅度消减。因此,恢复我国东北东部山地的阔叶红松林是广大林业工作者普遍共识,如何恢复该区域阔叶红松林也成为国内外学者普遍关注的问题<sup>[20]</sup>。20 世纪 80 年代初期,周晓峰<sup>[24]</sup>、陈大珂等<sup>[25]</sup>学者提出“栽针保阔”阔叶红松林恢复理论体系,该理论被认为是恢复东北地带性顶级植被阔叶红松林行之有效森林经营方式。目前我国东北利用“栽针保阔”理论形成的红松林将近 100 万 hm<sup>2</sup>。但是由于林分透光抚育缺失或迟缓,致使林下红松的生长遭受严重抑制,乃至死亡。因此在经营“栽针保阔”红松林过程中,需要及时对恢复进程中出现的问题进行深入的研究,以更好的完善和补充此理论体系,加快我国东北地带性植被阔叶红松林的恢复。故东北森林经营管理实践中需要了解透光抚育对这种复层异龄林土壤碳库的影响规律。

该试验是以长白山白河林业局 33 年生“栽针保阔”红松林为研究对象,分析不同透光抚育强度下红松林土壤密度、土壤碳含量、凋落物碳储量及土壤碳储量变化,探寻不同透光抚育强度对 33 年生“栽针保阔”红松林土壤碳储量及凋落物碳储量的影响,以期筛选出既能够促进东北地带性植被阔叶红松林恢复进程,又提高其土壤碳储量的管理经营模式。

## 1 研究地概况与研究方法

### 1.1 研究地概况

研究地位于吉林省敦化市长白山北坡白河林业

局春雷林场内(42°01′~42°48′N、127°53′~128°34′E),毗邻长白山自然保护区,平均海拔600~800 m,坡度4.5°~10.5°。属温带大陆性气候,年平均气温4.5~7.8℃,年平均降水量800~1040 mm,全年日照时数为2271~2503 h,无霜期109~140 d<sup>[26]</sup>。地带性顶级植被为阔叶红松林,土壤为暗棕色森林土,土壤剖面发育明显,平均土壤深度40 cm。目前,研究地林分类型主要为采伐后形成的次生林,样地内主要的植物有红松、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、春榆(*Ulmus pumila*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、毛榛子(*Corylus mandshurica*)卫茅(*Euonymus alatus*)、刺五加(*Radix acanthopanax*)、猴腿蹄盖蕨(*Athyrium multidentatum*)、木贼(*Hippochaete hiemale*)、蚊子草(*Filipendula palmata*)等。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 样地设置

样地位于白河林业局春蕾林场59林班,样地处于东南坡中坡位,1979年在次生林下栽种红松幼苗,栽植密度为2000~2500株/hm<sup>2</sup>,并在其后5年内每年进行1次穴状割灌除草,截止到2012年红松林龄已有33年。1996年(栽植红松17年后)在试验样地内进行不同强度的透光抚育试验(透光抚育采伐方式为“茎干伐”,即仅伐除乔木层树干,采伐剩余物被保留在样地内),试验进行5等强度上层透光试验处理(对照为不采伐、轻度透光抚育(25%)、中度透光抚育(50%)、重度透光抚育(75%)、全透光(100%)(透光强度指蓄积比例)。每种透光强度样地面积(100 m×100 m)约为1.00 hm<sup>2</sup>,且每种处理均设3块20 m×30 m标准地(即3次重复),总计15块标准地。然后,对各标准地进行了每木检尺(详见参考文献[27])、凋落物及土壤剖面调查,以阐明透光抚育对17年后“栽针保阔”红松林土壤碳储量的影响。

### 1.2.2 样品采集与分析

由于试验样地内40 cm以下为母质层,故该试验土壤剖面深度取到40 cm。按照“S”型曲线在每个标准地上随机挖出5个土壤剖面,并采用物理分层,每10 cm一层,共计4层。用100 cm<sup>3</sup>的土壤环刀在各土层中部重复3次取样,在105℃下烘24 h后,测定土壤密度。同时,每层取混合土样450 g装入土壤袋,自然风干后,用分析天平(0.1 mg)准确称量约0.5000 g土样,利用Multi N/C 3100和HT 1300 Solid Module (Analytik Jena A G, Germany)测定样品中土壤碳含量,并计算其土壤碳储量<sup>[28-29]</sup>。

第*i*个土层的土壤碳密度(SOC<sub>*i*</sub>, kg/m<sup>2</sup>)的计

算公式为:

$$\text{SOC}_i = C_i D_i E_i (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中: $C_i$ 为土层*i*的土壤碳含量, g/kg;  $D_i$ 为土层*i*的土壤密度, g/cm<sup>3</sup>;  $E_i$ 为土层*i*的厚度, cm;  $G_i$ 为直径大于2 mm的砾石所占的体积百分比, %。

如果某个土壤剖面由*k*层组成,该剖面的土壤碳密度(SOC, kg/m<sup>2</sup>)为:

$$\text{SOC} = \sum_{i=1}^k \text{SOC}_i \quad (2)$$

凋落物碳含量测定:在每块标准地中按照S型曲线任意选取5个1 m×1 m小样方,将小样方内所有凋落物带回实验室烘干,并测定其碳含量,根据烘干质量和碳含量,测算样地内凋落物的碳储量。

### 1.2.3 数据处理

数据处理利用Excel 2007。试验的单因素方差分析(one-way ANOVA)运用SPSS 18.0,检验不同数据组间的显著性差异采用最小显著差异法(LSD)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同透光抚育强度对“栽针保阔”红松林土壤密度的影响

据表1可知,长白山33年生“栽针保阔”红松林土壤密度受到不同透光抚育强度的影响。各样地的平均土壤密度分布在(0.83±0.02)~(1.15±0.03)g/cm<sup>3</sup>之间,轻、中度透光抚育样地较对照样地降低了2.6%和8.4%,仅中度透光抚育与对照存在显著差异性( $P < 0.05$ );强度透光抚育与全透光样地较对照样地提高了23.3%和27.1%,且两者与对照均存在显著差异性( $P < 0.05$ )。因此,中度透光抚育显著降低了其土壤密度,强度透光和全透光显著提高了其土壤密度,而轻度透光对其并没有产生显著影响。

透光抚育对其土壤密度空间分布格局也产生了影响。在水平分布上,0~40 cm各土层密度分布在(0.41±0.06)~(1.51±0.16)g/cm<sup>3</sup>之间,与对照样地相应土壤层相比较,轻、中度透光抚育样地各土层的密度分别降低了1.8%~4.8%和6.8%~9.7%;但仅有中度透光抚育样地30~40 cm土壤层密度降低显著(9.7%,  $P < 0.05$ ),强度透光抚育与全透光样地各土层密度均显著高于对照(14.4%~38.1%和18.0%~42.9%,  $P < 0.05$ )。因此,轻度透光抚育对其各土层密度的影响均不显著,中度透光抚育仅显著降低了其下部土层(30~40 cm)的密度,强度透光与全透光却显著提高其各土壤层的土壤密度。

表 1 不同采伐强度下红松林的土壤密度

Tab. 1 Soil bulk density of Korean pine forests at different thinning intensities

g·cm<sup>-3</sup>

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment				
	对照 CK	轻度透光 Mild liberation cutting	中度透光 Moderate selective cutting	强度透光 Heavy liberation cutting	全透光 Clear cutting
0~10	0.44 ± 0.07 Da	0.43 ± 0.07 Da	0.41 ± 0.06 Da	0.57 ± 0.14 Cb	0.59 ± 0.09 Db
10~20	0.84 ± 0.19 Ca	0.80 ± 0.24 Ca	0.78 ± 0.07 Ca	1.16 ± 0.31 Bb	1.20 ± 0.24 Cb
20~30	1.11 ± 0.18 Ba	1.09 ± 0.23 Ba	1.01 ± 0.12 Ba	1.27 ± 0.08 Bb	1.31 ± 0.16 BCb
30~40	1.24 ± 0.10 ABa	1.21 ± 0.11 ABab	1.12 ± 0.10 Ab	1.47 ± 0.10 Ac	1.51 ± 0.16 Ac
0~40	0.90 ± 0.03 a	0.88 ± 0.02 ab	0.83 ± 0.02 b	1.13 ± 0.02 c	1.15 ± 0.03 c

注:不同小写字母表示各处理土壤密度差异显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示各土层深度的土壤密度差异显著( $P < 0.05$ );表中数值为平均值 ± 标准偏差(Mean ± SD);下同。Notes: Different capital letters represent that the soil bulk density is significantly different among different soil depths, different small letters represent that the soil bulk density is significantly different under different treatments ( $P < 0.05$ ); The same below. Note: Data are expressed as Mean ± SD. The same below.

在垂直分布上,各处理样地的土壤密度均呈现出随土壤深度加深而增大,但各样地土壤密度的垂直层次结构有所不同。轻度透光抚育样地与对照样地相一致,在0~10、10~20、20~40 cm 3个土壤层之间存在显著差异性( $P < 0.05$ ),可分为3层;中度透光抚育样地在0~10、10~20、20~30、30~40 cm 4个土层之间均存在着显著差异性( $P < 0.05$ ),可分为4层;强度透光抚育和全透光样地在0~10、10~30、30~40 cm 3个土壤层之间存在显著差异性( $P < 0.05$ ),也可分为3层。因此,中度透光抚育、强度透光抚育与全透光改变了其土壤密度的垂直分布格局。

## 2.2 不同透光抚育强度对“栽针保阔”红松林土壤碳含量的影响

分析表2可得,各样地的平均土壤碳含量分布在(43.36 ± 1.60) ~ (70.26 ± 1.94) g/kg之间。轻、中度透光抚育样地较对照样地提高了4.3%和14.9%;但仅有中度透光抚育样地与对照存在显著差异性( $P < 0.05$ ),强度透光抚育与全透光样地显著较对照样地降低了23.7%和29.1% ( $P < 0.05$ )。因此,中等强度透光抚育显著提高了样地内土壤碳含量( $P < 0.05$ ),强度与全透光则显著降低了样地内土壤碳含量,而轻度透光抚育对样地内土壤碳含量并没有产生显著影响。

表 2 不同采伐强度下红松林的土壤碳含量

Tab. 2 Soil carbon concentration of Korean pine forests at different thinning intensities

g·kg<sup>-1</sup>

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment				
	对照 CK	轻度透光 Mild liberation cutting	中度透光 Moderate liberation cutting	强度透光 Heavy liberation cutting	全透光 Clear cutting
0~10	101.51 ± 14.17 Aa	105.71 ± 19.70 Aa	115.04 ± 16.31 Aa	74.58 ± 22.70 Ac	68.08 ± 19.41 Ac
10~20	64.31 ± 11.34 Ba	65.31 ± 10.72 Ba	75.82 ± 15.07 Bb	50.23 ± 9.08 Bc	49.14 ± 7.27 Bc
20~30	44.19 ± 7.79 Ca	46.98 ± 9.86 Ca	51.88 ± 12.15 Ca	35.49 ± 8.60 BCb	30.90 ± 1.71 Cb
30~40	34.48 ± 3.90 Da	36.99 ± 4.28 Da	38.28 ± 6.39 Da	26.36 ± 4.05 Cb	25.30 ± 3.20 Cb
0~40	61.12 ± 2.04 a	63.75 ± 2.32 a	70.26 ± 1.94 b	46.67 ± 2.09 c	43.36 ± 1.60 c

不同透光抚育强度对土壤碳含量的空间分布格局产生了影响。在水平分布上,0~40 cm各土层碳含量分布在(25.30 ± 3.20) ~ (115.04 ± 16.30) g/kg之间,与对照样地相应土层相比较,轻、中度透光抚育使各土层碳含量均有所提高(4.1%~7.3%和11.0%~17.9%),但仅中度透光抚育显著提高了其10~20 cm土层的碳含量(17.9%, $P < 0.05$ ),而

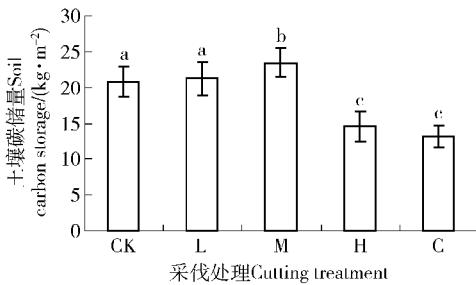
强度透光抚育与全透光均显著降低了其各土层的碳含量(19.7%~26.5%和23.6%~32.9%, $P < 0.05$ )。因此,轻度透光抚育对其碳含量无显著影响,中等强度透光抚育提高了10~20 cm土层的碳含量( $P < 0.05$ ),而强度透光与全透光显著降低了各土层的碳含量( $P < 0.05$ )。

在垂直分布上,各试验处理的土壤碳含量均呈

现随土壤深度增加而递减规律,但每处理土壤碳含量的垂直层次结构表现不同。轻、中度透光处理样地与对照样地相一致,在0~10、10~20、20~30、30~40 cm 土层之间均呈现出显著差异性,则可分4层;而强度透光抚育和全透光样地在0~10、10~20、20~40 cm 土层之间存在着显著差异性,可分3层。因此,强度透光抚育和全透光改变了“栽针保阔”红松林土壤碳含量的垂直分布格局,而轻、中度透光抚育对其垂直分布格局并无显著影响。

### 2.3 透光抚育对“栽针保阔”红松林土壤碳储量的影响

由图1可知,不同强度的透光抚育强度能够影响长白山33年生“栽针保阔”红松林土壤碳储量。对照样地CK、轻度透光(L)、中度透光(M)、强度透光(H)、全透光(C)样地的土壤碳储量依次为(20.80±2.08)、(21.29±2.36)、(23.46±2.03)、(14.59±2.10)、(13.12±1.57) kg/m<sup>2</sup>,轻、中度透光抚育样地较对照样地分别提高了2.4%和12.8%;但仅中度透光抚育与对照有显著差异性( $P < 0.05$ ),强度透光抚育与全透光样地较对照样地分别降低了29.9%和36.9% ( $P < 0.05$ )。因此,中度透光抚育显著提高了土壤碳储量,强度透光抚



对照样地 CK; L. 轻度透光 Mild liberation cutting; M. 中度透光 Moderate liberation cutting; H. 强度透光 Heavy liberation cutting; C. 全透光 Clear cutting. 不同小写字母表示不同处理土壤有机碳储量差异显著 ( $P < 0.05$ ). Different small letters represent the total soil organic carbon storage significant difference under different treatments.

图1 不同采伐强度下红松林的土壤有机碳储量

Fig. 1 Soil carbon storage of Korean pine forests at different thinning intensities

表3 不同采伐强度下红松林土壤碳密度垂直分布

Tab. 3 Vertical distribution of soil carbon storage from Korean pine forests at different thinning intensities kg·m<sup>-2</sup>

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment				
	对照 CK	轻度透光 Mild liberation cutting	中度透光 Moderate liberation cutting	强度透光 Heavy liberation cutting	全透光 Clear cutting
0~10	8.26 ± 1.15 Aa	8.35 ± 1.61 Aa	9.19 ± 1.33 Aa	6.07 ± 1.85 Ab	5.29 ± 1.58 Ab
10~20	5.75 ± 1.01 Ba	5.84 ± 0.96 Bab	6.78 ± 1.35 Bb	3.60 ± 0.81 Bc	3.50 ± 0.65 Bc
20~30	4.04 ± 0.71 Ca	4.30 ± 0.90 Ca	4.75 ± 1.11 Ca	2.88 ± 0.79 BCb	2.46 ± 0.16 Cb
30~40	2.76 ± 0.34 Da	2.81 ± 0.38 Da	2.74 ± 0.56 Da	2.05 ± 0.36 Cb	1.87 ± 0.28 Cb

育与全透光则使其显著降低,而轻度透光抚育对其并无显著影响。

由表3可以得到,透光抚育对其土壤碳储量的空间分布格局也有影响。在水平分布上,0~40 cm 各土层的碳密度分布在(1.87±0.28)~(9.19±1.33) kg/m<sup>2</sup>之间;其中,轻度透光抚育样地各土层的碳储量较对照样地相应土层均有所提高(1.1%~6.4%),但各土层与对照均无显著差异性;中度透光抚育样地0~30 cm 3个土层高于对照样地相应土层(11.3%~17.9%),30~40 cm 土层略低于对照(-0.7%),但仅有10~20 cm 土层与对照存在显著差异性(17.9%, $P < 0.05$ );而强度透光抚育与全透光样地各土层的碳储量均显著低于对照样地相应土层(25.7%~37.4%和32.3%~39.1%, $P < 0.05$ )。因此,轻度透光抚育并未改变其土壤碳储量的水平分布格局,中度透光抚育仅显著提高了其10~20 cm 土层的碳储量,强度透光抚育与全透光则显著降低了其各土层(0~40 cm)的碳储量。

在垂直分布方面,各采伐处理样地的土壤碳密度均呈现出随土壤深度增加而递减的分布规律性,但各处理样地土壤碳储量的垂直层次结构有所不同。轻、中度透光抚育样地与对照样地相一致,在0~10、10~20、20~30、30~40 cm 土层之间均存在显著差异性,可分4层;而强度透光抚育与全透光样地土壤碳储量的垂直层次结构与对照并不一致,在0~10、10~20、20~40 cm 土层之间均存在着显著差异性,可分为3层。因此,轻、中度透光抚育对其土壤碳储量的垂直分布格局并无影响,而强度透光抚育与全透光却改变了其垂直分布格局。

### 2.4 透光抚育对“栽针保阔”红松林凋落物碳储量的影响

分析表4可知,透光抚育对于长白山中期“栽针保阔”红松林凋落物量具有影响。其各处理样地凋落物储量分布范围在(6.11±0.42)~(7.45±0.79) t/hm<sup>2</sup>之间,轻、中度透光样地较对照分别显著提高了8.6%和13.7% ( $P < 0.05$ );强度透光抚育和全透光样地分别降低1.2%和6.7%,但仅全透

光降低显著 ( $P < 0.05$ )。说明轻、中度透光抚育能够提高 33 年生“栽针保阔”红松林的凋落物量,且中度透光抚育比轻度透光抚育幅度更大,而强度透光抚育和全透光会降低其凋落物量,且全透光使其显著降低。

透光抚育强度对凋落物碳含量没有显著影响(表 4)。其各处理样地凋落物碳含量分布在

(348.91 ± 23.21) ~ (376.03 ± 27.36) g/kg 之间,与对照样地相比较,中度透光抚育样地提高了 4.3%,轻度透光抚育、强度透光抚育与全透光样地则降低了 0.4%、2.8% 和 3.2%,但各试验处理与对照样地之间无显著差异性 ( $P > 0.05$ ),说明“栽针保阔”红松林凋落物碳含量并未受到各种强度透光抚育的影响。

表 4 不同采伐强度下红松林凋落物碳储量

Tab. 4 The litter carbon storage of Korean pine forests under different thinning intensities for different thinning intensities

指标 Item	处理 Treatment				
	对照 CK	轻度透光 Mild liberation cutting	中度透光 Moderate liberation cutting	重度透光 Heavy liberation cutting	全透光 Clear cutting
凋落物量 Litterbiomass / (t·hm <sup>-2</sup> )	6.55 ± 0.93 a	7.11 ± 0.47 b	7.45 ± 0.79 c	6.47 ± 0.67 c	6.11 ± 0.42 d
凋落物碳含量 Litter carbon concentration / (g·kg <sup>-1</sup> )	360.52 ± 16.32 a	359.23 ± 22.59 a	376.03 ± 27.36 a	350.32 ± 34.58 a	348.91 ± 23.21 a
凋落物碳储量 Litter carbon storage / (t·hm <sup>-2</sup> )	2.36 ± 0.25 ab	2.55 ± 0.33 b	2.82 ± 0.37 c	2.27 ± 0.29 a	2.13 ± 0.39 d

试验样地的凋落物碳储量很大程度上受到透光抚育强度的影响。其各透光抚育试验样地凋落物碳储量在(2.13 ± 0.39) ~ (2.82 ± 0.37) t/hm<sup>2</sup>之间,强度透光和全透光样地的凋落物碳储量分别较对照样地降低了 3.8% 和 9.8%,但全透光处理较之有显著降低 ( $P < 0.05$ );轻、中度透光样地分别较对照提高 8.1% 和 19.5%,但仅有中度透光样地较之有显著提高 ( $P < 0.05$ )。因此,中等强度透光能够提高“栽针保阔”红松林内凋落物的碳储量,全透光处理样地则会降低样地内凋落物的碳储量。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 不同透光抚育强度对“栽针保阔”红松林土壤密度的影响

本研究表明,透光抚育强度对长白山 33 年生“栽针保阔”红松林土壤密度是有影响的,即中度透光抚育降低了其土壤密度(仅显著降低了 30 ~ 40 cm 土层的密度),而强度透光抚育与全透光则提高了其土壤密度(两者显著提高了 0 ~ 40 cm 土层的密度)。这与土壤密度随着透光抚育强度增大而增大的研究结论<sup>[30]</sup>一致,而与全透光并未使土壤密度发生显著变化<sup>[31]</sup>的研究结论不同。分析其原因,可能是强度透光抚育或全透光伐除了大部分或全部上层阔叶树,透光抚育后数年(5 ~ 8 年),样地内红松仍未郁闭成林,林内光照增强、空气温度与土壤温度升高<sup>[32]</sup>,加速了微生物的分解过程<sup>[33]</sup>,使得土壤中有有机质减少,进而导致土壤密度的增加。同时,强度透光抚育与全透光减少了森林凋落物的输入量,甚至

会使采伐迹地地表裸露,样地内土壤表层直接遭到降雨侵蚀,带走土壤中的有机质,且其淋溶过程也会增强<sup>[12]</sup>;这样会导致土壤有机碳含量迅速降低,也会使土壤密度有所增加。而中度透光抚育仅伐除部分上层林木(50%),又促进了林下红松的生长,群落内微气候的变化相对较小,并为对微生物的活动及分解过程造成影响,这有利于样地内土壤碳的维持,加之凋落物输入量的逐步增加(表 4),既有利于补充土壤碳,又减少了雨水侵蚀及淋溶过程的碳损失,进而导致土壤密度的降低。

#### 3.2 不同透光抚育强度对“栽针保阔”红松林土壤有机碳含量的影响

长白山 33 年生“栽针保阔”红松林土壤碳含量显著受到透光抚育强度的影响,即中度透光抚育提高了其土壤碳含量(显著提高了 10 ~ 20 cm 土层的碳含量),而强度透光抚育与全透光降低了样地内土壤碳含量(两者显著降低了 0 ~ 40 cm 土层的碳含量)。其中,中度透光提高样地内土壤碳含量结果与透光抚育使森林土壤碳含量增加的结论<sup>[12,19]</sup>相一致。这可能是中度透光抚育林分的上层保留林木相对较多,群落内微气候较为稳定,对土壤呼吸过程影响程度相对较弱,土壤碳的损失较少;同时,透光抚育又促进了林内红松的快速生长(其红松平均胸径生长量较对照样地提高了 1 倍)(表 1),能够补偿因上层林木采伐引起的凋落物量损失,甚至增加了样地内凋落物的输入量(表 4),进而提高其土壤碳含量。

强度透光抚育与全透光降低土壤碳含量与现有

研究结论<sup>[9,34-35]</sup>相一致。分析其原因,可能是强度透光抚育(75%)与皆伐(100%)伐除了大部分或全部上层阔叶树,使得群落内微气候有了很大的改变(光照增强、温度升高、湿度适宜等),加速了土壤微生物的分解速率,导致各土层有机碳的释放和流失<sup>[36-38]</sup>,并且这种影响可持续数年(8~10年),直至林内红松郁闭成林后其影响方能被削弱或解除。同时,过强的透光抚育还会减少森林地被物层的凋落物输入量,进而导致土壤碳含量的持续降低<sup>[36]</sup>。本研究中上层透光抚育16年后,全透光林地凋落物输入量虽显著低于对照林分,但已与对照相近(仅降低6.7%),而强度透光抚育林分的凋落物输入量已经恢复到未采伐林分水平(仅降低1.2%)(表4)。主要是过强的透光抚育极大地促进了林内红松的生长(两者红松平均胸径生长量较对照样地提高了2.1~2.8倍)<sup>[27]</sup>,进而补偿了上层阔叶树采伐引起的凋落物损失,随着时间的推移及阔叶红松林的发展,其凋落物输入量还将会进一步增大。但在过强度透光抚育的前期阶段,凋落物输入量持续减少也可能是导致样地内的土壤碳含量降低的主要原因之一。

### 3.3 不同透光抚育强度对“栽针保阔”红松林土壤有机碳储量的影响

本研究表明,长白山林区天然次生林下栽植红松17年后,采取中等强度(50%)上层透光抚育能够提高其土壤碳储量,而采取强度透光抚育(75%)与全透光(100%)则会降低其土壤碳储量。其影响机制为:中度透光抚育对林内微气候的影响较弱,致使林内土壤向外排放碳损失较少,且中等强度的抚育能够有效提高样地内凋落物输入量,进一步提高其土壤碳含量,降低土壤密度;且前者增加趋势大于后者的降低趋势,两者综合作用导致其土壤碳储量的显著提高。强度透光抚育与全透光干扰对林内微气候的影响相对较大,土壤向外排放碳相对较大,并且其凋落物的输入量在一段时间内持续降低,一般会降低其土壤碳含量及提高其土壤碳密度,且前者的降低趋势大于后者的增加趋势,结果导致其土壤碳储量的显著降低。这一研究结果与适度采伐能够提高土壤碳储量,强度和过强度的透光抚育使得土壤碳储量降低的研究结论<sup>[15,39]</sup>较为一致,而与透光抚育对森林土壤碳储量无任何影响的结论有所不同<sup>[13,40]</sup>。此外,栽针未采伐(对照)、轻度透光抚育、中度透光抚育的中期(33年生)“栽针保阔”红松林的土壤碳储量( $(20.81 \pm 2.08)$ 、 $(21.30 \pm 2.36)$ 、 $(23.46 \pm 2.03)$  kg/m<sup>2</sup>)与我国东北地区平均土壤碳储量 $(21.27 \text{ kg/m}^2)$ <sup>[41]</sup>相近(-2.1%~10.2%),说

明在次生林下栽植红松并采取中、低度上层透光抚育方式仍能维持相对较高的土壤碳储量。因此,从维持或提高林分内土壤碳储量角度出发,对我国东北东部山地次生林采取“栽针保阔”途径并结合中低度透光抚育方式加以经营比较适宜。

### 3.4 不同透光抚育强度对“栽针保阔”红松林凋落物碳储量的影响

本研究表明,次生林下栽植红松并采取中度透光抚育能够提高其凋落物碳储量,而采取上层全透光则会降低其凋落物碳储量。其影响机制为:中度透光抚育通过增加凋落物量而提高其碳储量,全透光则是通过减少凋落物量而降低其碳储量。上述研究结果与目前一些学者关于森林凋落物层碳储量随着间采伐强度加大而递减<sup>[42-43]</sup>结果不同。究其原因可能是研究对象导致结论的不统一,此类结论主要以针叶纯林为研究对象,而本研究是采用“栽针保阔”森林经营方式形成的复层针阔混交红松林。由于上层采伐强度逐渐加大,林下种植的红松得到的光照、营养及空间较为充足多;因此,林下红松生长加快,这就有可能补偿甚至超过因上层林木的透光抚育而引起的凋落物量的减少,进一步导致样地内凋落物量及碳储量的增加;同时,上层透光抚育后其留下地下部分也有可能增加土壤中碳库来源。至于上层全透光会降低其凋落物碳储量可能是其凋落物输入来源仅依靠林下新形成的红松林来实现,目前红松仅33年生,尚处于发展阶段,随着时间推移,其凋落物碳储量将会进一步得到恢复乃至提高。

### 参 考 文 献

- [1] VALENTINI R, MATTEUCCI G, DOLMAN A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests [J]. *Nature*, 2000, 404: 861-865.
- [2] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. *Nature*, 1982, 298: 156-159.
- [3] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263: 185-189.
- [4] KIRSCHBAUM M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6): 753-760.
- [5] JURGENSEN M F, HARVEY A E, GRAHAM R T, et al. Impacts of timber harvesting on soil organic matter, nitrogen, productivity, and health of inland northwest forests [J]. *Forest Science*, 1997, 43(2): 234-251.
- [6] GRIGAL D F, VANCE E D. Influence of soil organic matter on forest productivity [J]. *New Zealand Forest Research Institute*, 2000, 30(1/2): 169-205.
- [7] NAVE L E, VANCE E D, SWANSTON C W, et al. Harvest

- impacts on soil carbon storage in temperate forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(5): 857-866.
- [8] BROWN S, SATHAYE J, CANNELL M, et al. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions[R]. Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.
- [9] 骆士寿, 陈步峰, 陈永富, 等. 海南岛霸王岭热带山地雨林采伐经营初期土壤碳氮储量[J]. *林业科学研究*, 2000, 13(2): 123-128.
- LUO T S, CHEN B F, CHEN Y F, et al. Variation of the soil carbon and nitrogen for initial stage after the felling in tropical montane rainforest of Bawangling, Hainan Island [J]. *Forest Research*, 2000, 13(2): 123-128.
- [10] 方晰, 田大伦, 项文化. 不同经营方式对杉木林采伐迹地土壤碳储量的影响[J]. *中南林业学院学报*, 2004, 24(1): 1-5.
- FANG X, TIAN D L, XIANG W H. Effects of different management patterns on soil carbon storage of the deforested lands in Chinese fir plantation [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2004, 24(1): 1-5.
- [11] 袁喆, 罗承德, 李贤伟, 等. 间伐强度对川西亚高山人工云杉林土壤易氧化碳及碳库管理指数的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 127-131.
- YUAN Z, LUO C D, LI X W, et al. Soil readily oxidizable carbon and carbon pool management index in spruce plantation (*Picea asperata*) with different thinning intensity in western [J]. *Sichuan Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 127-131.
- [12] JOHNSON D W, CURTIS P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta-analysis [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 140(23): 227-238.
- [13] 王海燕, 雷相东, 张会儒, 等. 近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(3): 11-16.
- WANG H Y, LEI X D, ZHANG H R, et al. Soil organic carbon in semi-natural mixed larch-spruce-fir stands of Northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(3): 11-16.
- [14] 成向荣, 虞木奎, 葛乐, 等. 不同间伐强度下麻栎人工林碳密度及其空间分布[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1175-1180.
- CHENG X R, YU M K, GE L, et al. Carbon density and its spatial distribution in *Quercus acutissima* plantations under different thinning intensities [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1175-1180.
- [15] VARGAS R, ALLEN E B, ALLEN M F. Effects of vegetation thinning on above- and belowground carbon in a seasonally dry tropical forest in Mexico [J]. *Biotropica*, 2009, 41: 302-311.
- [16] PIENE H, VAN CLEVE K. Weight loss of litter and cellulose bags in a thinned white spruce forest in interior Alaska [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1978, 8: 42-46.
- [17] 于海群, 刘勇, 李国雷, 等. 油松幼龄人工林土壤质量对间伐强度的响应[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(3): 65-70.
- YU H Q, LIU Y, LI G L, et al. Response of soil quality to thinning intensity in young *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(3): 65-70.
- [18] 黄从德, 张国庆, 唐宵, 等. 四川省马尾松人工林土壤有机碳密度研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(2): 46-49.
- HUANG C D, ZHANG G Q, TANG X, et al. Study on Soil organic carbon densities of artificial *Pinus massoniana* in Sichuan Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(2): 46-49.
- [19] 殷鸣放, 周立君, 殷炜达. 长白落叶松人工林带状间伐方式对土壤有机碳含量的影响[J]. *林业科学*, 2012, 48(7): 170-173.
- YIN M F, ZHOU L J, YIN W D. Effects of different thinning manners on the soil organic carbon content of *Larix olgensis* plantations [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(7): 170-173.
- [20] 李景文. 红松混交林生态与经营[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1997: 20-21.
- LI J W. Ecology and management of broad-leaved Korean pine [M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1997: 20-21.
- [21] 李俊清, 王业莲. 天然林内红松种群数量变化的波动性[J]. *生态学杂志*, 1986, 5(5): 1-5.
- LI J Q, WANG Y J. The Volatility of the number about population of *Pinus koraiensis* natural forests [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1986, 5(5): 1-5.
- [22] 葛剑平, 李景文, 郭海燕. 天然红松树木生长特征与林分结构的研究[J]. *东北林业大学学报*, 1992, 20(2): 9-15.
- GE J P, LI J W, GUO H Y. Research on stand structure and growth characteristics of natural Korean pine trees [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1992, 20(2): 9-15.
- [23] 郝占庆, 陶大立, 赵士洞. 长白山北坡阔叶红松林及其次生白桦林高等植物物种多样性比较[J]. *应用生态学报*, 1994, 5(1): 16-23.
- HAO Z Q, TAO D L, ZHAO S D. Diversity of higher plants in broad-leaved Korean pine and secondary birch forests on northern slope of Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, 5(1): 16-23.
- [24] 周晓峰. 红松阔叶林的恢复途径: 栽针保阔[J]. *东北林学院学报*, 1982, 10(增刊): 18-28.
- ZHOU X F. Restoration approach of broad-leaved Korean pine: Korean pine forests restored by planting conifer and reserving broad-leaved trees [J]. *Journal of Northeast Forestry College*, 1982, 10(Suppl.): 18-28.
- [25] 陈大珂, 周晓峰, 丁宝永, 等. 黑龙江省天然次生林研究 I: 栽针保阔的经营途径[J]. *东北林业大学学报*, 1984, 12(4): 1-12.
- CHEN D K, ZHOU X F, DING B Y, et al. Research on natural secondary forest of Heilongjiang province; management approach of Korean pine forests restored by planting conifer and reserving broad-leaved trees [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1984, 12(4): 1-12.
- [26] 赵淑清, 方精云, 宗占江, 等. 长白山北坡植物群落组成结构及物种多样性的垂直分布[J]. *生物多样性*, 2004, 12(1): 164-173.
- ZHAO S Q, FANG J Y, ZONG Z J, et al. Composition, structure and species diversity of plant communities along an altitudinal gradient on the northern slope of Mt. Changbai, Northeast China [J]. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 164-173.
- [27] 张晓亮, 牟琦, 牟长城, 等. 透光抚育对长白山“栽针保阔”红松林群落结构和凋落物影响[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42



- (3):818-822.
- ZHANG X L, MU Q, MU C C, et al. Effects of liberation felling on structure and litter of the Korean pine forests by planting conifer and reserving broad-leaved trees in Changbai Mountains of China [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(3): 818-822.
- [28] 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):2875-2882.
- YANG J Y, WANG C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11):2875-2882.
- [29] 刘夏,牟长城,周文昌,等. 采伐对小兴安岭森林沼泽土壤碳质量分数和碳密度的影响[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(1):42-47.
- LIU X, MU C C, ZHOU W C, et al. Effects of cutting on soil carbon content and density of forested swamps in Xiao Hinggan Mountain Northeast China [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(1):42-47.
- [30] MARTIARENA R A, FRANGI J L, PINAZO M A, et al. Effect of thinning and harvest type on storage and losses of phosphorus in *Pinus taeda* plantations in subtropical Argentina [J]. International Journal of Forestry Research, 2010, 2011:761-532.
- [31] 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.
- [32] 牟长城,吴云霞,李婉姝,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.
- MU C C, WU Y X, LI W S, et al. Effects of forest cutting on greenhouse gas emissions from *Larix gmelini-Sphagnum swamps* in Lesser Xing' An Mountains of Heilongjiang China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2):287-293.
- [33] BINKLEY D, FISHER R. Ecology and management of forest soils [M]. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [34] FISHER R F, BINKLEY D, PRITCHETT W L. Ecology and management of forest soils [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [35] DAVIDSON E A, HART S C, FIRESTONE M K. Internal cycling of nitrate in soils of a mature coniferous forest [J]. Ecology, 1992, 73(4):1148-1156.
- [36] POWERS R F, FRAZER D W, MCCOLL J G. Soil nitrogen mineralization in a clear cutting chronosequence in a northern California conifer forest [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(4): 1145-1152.
- [37] 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.
- [38] 卢慧翠,牟长城,王彪,等. 采伐对大兴安岭落叶松-苔草沼泽土壤有机碳储量的影响[J]. 林业科学研究, 2013, 26(4): 459-466.
- LU H C, MU C C, WANG B, et al. Effects of harvesting on soil organic carbon storage of boreal *Larix gmelinii-Carex schmidtii* wetlands in Da Xing An Ling [J]. Forest Research, 2013, 26(4): 459-466.
- [39] 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.
- [40] JOHNSON D W. Effects of forest management on soil carbon storage [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1992, 64(1): 83-120.
- [41] 王绍强,周成虎,刘纪远,等. 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析[J]. 地理学报, 2001, 56(4):390-400.
- WANG S Q, ZHOU C H, LIU J Y, et al. Simulation analysis of terrestrial carbon cycle balance model in Northeast China [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4):390-400.
- [42] VESTERDAL L, DALSGAARD M, FELBY C, et al. Effects of thinning and soil properties on accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus in the forest floor of Norway spruce stands [J]. Forest Ecology and Management, 1995, 77: 1-10.
- [43] CAREY M, HUNTER I, ANDREW I. *Pinus radiata* forest floors: factors affecting organic matter and nutrient dynamics [J]. New Zealand Journal Forestry Science, 1982, 23: 390-402.

(责任编辑 赵 勃  
责任编辑委 臧润国)