

DOI: 10.5846/stxb201601270197

罗春林,侯琳,白龙龙,耿增超,和文祥.抚育对林地土壤碳释放的影响——基于 Yasso07 估算.生态学报,2017,37(9):2894–2903.

LUO C L, HOU L, BAI L L, GENG Z C, HE W X. Effects of forest thinning on soil CO<sub>2</sub> emissions in a pine-oak mixed stand in the Qinling Mountains based on the Yasso07 model estimate. Acta Ecologica Sinica 2017, 37(9): 2894–2903.

## 抚育对林地土壤碳释放的影响 ——基于 Yasso07 估算

罗春林<sup>1</sup>, 侯琳<sup>1,2,\*</sup>, 白龙龙<sup>1</sup>, 耿增超<sup>3</sup> 和文祥<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 西北农林科技大学林学院 杨凌 712100

<sup>2</sup> 教育部西部生态与环境修复重点实验室 杨凌 712100

<sup>3</sup> 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100

**摘要:** 间伐是森林经营的有效措施之一,其能减少林木枯损,有利于林下植被生长和植物种群更新,但也可改变森林小气候,从而影响林地土壤碳释放。以秦岭火地塘林区松栎混交林为研究对象,运用 Yasso07 模型模拟了不同间伐强度和间伐残留物移除强度下林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放。结果表明:(1) 针叶树种(油松 *Pinus tabulaeformis*、华山松 *Pinus armandi*) 和阔叶树种(锐齿栎 *Quercus aliena* var. *acuteserrata*) 叶凋落物化学组分有较明显差异,针叶树种酒精溶解性化合物(ESC) 和水溶性化合物(WSC) 含量明显低于阔叶树种,其不溶性化合物(NSC) 含量明显高于阔叶树种;(2) 凋落物化学组分对林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放有显著的影响;(3) 在研究两个控制因子中,间伐强度是影响林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放的主导因子,间伐后林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量有升高趋势;当间伐强度为 12.38%,间伐残留物移除强度为 53.18%时,林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量最小,为 15.318 Mg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。

**关键词:** 间伐;土壤碳释放;Yasso07 模型;松栎混交林;秦岭

## Effects of forest thinning on soil CO<sub>2</sub> emissions in a pine-oak mixed stand in the Qinling Mountains based on the Yasso07 model estimate

LUO Chunlin<sup>1</sup>, HOU Lin<sup>1,2,\*</sup>, BAI Longlong<sup>1</sup>, GENG Zengchao<sup>3</sup>, HE Wenxiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

<sup>2</sup> Education of Ministry Key Laboratory of Environment and Ecology in West China, Yangling 712100, China

<sup>3</sup> College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

**Abstract:** Natural forest-protection programs have been implemented to increase stand volume and forest ecosystem diversity, and to improve forest resources. However, they have had some negative influences on forests, such as high stand density and poor growth, and these can easily lead to insect outbreaks and fire disasters. Forest thinning can effectively eliminate the negative influences caused by natural forest protection management. Forest thinning programs have been conducted for several years and these approaches have led to reduced tree mortality and accelerated natural regeneration. However, it has been demonstrated that forest micro-climates influence soil CO<sub>2</sub> emissions. This study investigated the effects of forest thinning on soil CO<sub>2</sub> emissions using the Yasso07 model to simulate a pine-oak mixed forest in the Huoditang forest zone area of the Qinling Mountains. The topography of the Qinling Mountains is complicated and fractured, so it is difficult to duplicate experimental plots in a randomized block design. Therefore, the quadratic general rotary design was applied, and thinning and residue-removed intensity were the factors in the experiment. Thirteen experimental plots were

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201304307)

收稿日期: 2016-01-27; 网络出版日期: 2016-12-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: houlin\_1969@nwsuaf.edu.cn

<http://www.ecologica.cn>

selected, including five control levels and nine treatment plots. Five litter-fall collection frames (1 m × 1 m) were laid in each experimental plot. The litter fall was collected each month from September 2012 to September 2014. The ethanol-soluble, water-soluble, acid-soluble, and non-soluble compound contents in the leaf litter fall were determined. Although the technology to measure soil CO<sub>2</sub> emissions has continually improved, the soil spatial heterogeneity and strong soil carbon stability in undisturbed habitats has led to inaccuracies in the evaluation methods used in forest soil carbon dynamics research. Yasso07 is a soil-carbon decomposition model and is based on the assumption that there are four types of litter transformation. Yasso07 has been widely used in Europe and the United States because it can be operated easily; requires few parameters, which are easy to obtain; and the simulated results are reliable. However, there was no basis to determine if it could be applied in the Qinling Mountains. Therefore, this study validated the reliability of the Yasso07 model in this region. The soil CO<sub>2</sub> emission traits under different thinning and residue-removed intensities were analyzed based on simulations by the model. The following results were obtained: (1) there was a significant difference between the conifer and broadleaf litter chemical compositions. The ethanol and water soluble compound contents were significantly higher in the conifer tree litter than in the broadleaf tree litter, and the non-soluble compound content was significantly lower in conifer litter than in broadleaf litter. (2) The chemical composition of the litter fall significantly affected soil CO<sub>2</sub> emissions, and (3) thinning intensity was the key factor affecting CO<sub>2</sub> emissions. Soil CO<sub>2</sub> emissions increased after forest thinning, and when the thinning and residue-removed intensities were 12.38% and 53.18%, respectively, the soil CO<sub>2</sub> emission fell to a minimum of -15.318 Mg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>.

**Key Words:** forest thinning; Soil CO<sub>2</sub> emission; Yasso07 soil carbon model; Pine-oak mixed forest; the Qinling Mountains

天然林保护工程的实施,使我国森林资源明显改善,但长期保护导致天然林密度过大、更新困难、地表枯落物分解不良等,影响了森林生态系统服务功能的充分发挥<sup>[1]</sup>。间伐是森林经营最有效的措施之一<sup>[2-3]</sup>,其能优化林内环境,减少林木枯损,有利于林下植被生长和植物种群更新<sup>[2,4]</sup>。但间伐也能改变土壤微环境和呼吸底物的输入,从而影响林地土壤呼吸<sup>[5-6]</sup>,而森林土壤碳释放速率的微小变化也会引起大气 CO<sub>2</sub> 浓度的改变<sup>[7]</sup>。

目前国内外有关间伐对林地土壤呼吸影响的研究存在较大争议<sup>[8-12]</sup>,有研究表明间伐对土壤 CO<sub>2</sub> 释放的影响不显著<sup>[8]</sup>;有的则认为间伐降低了土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率<sup>[9]</sup>;还有结果表明间伐增加了土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率<sup>[11]</sup>,中度间伐对土壤呼吸有促进作用<sup>[13]</sup>且土壤碳释放随间伐强度增加而波动<sup>[14]</sup>。

长期以来,林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放野外测定技术虽然在不断改进<sup>[15-16]</sup>,但由于林地土壤的空间异质性、无干扰情况下林地有机土壤碳较强的稳定性和土壤碳库变化的不确定性<sup>[17-18]</sup>,导致直接观测林地土壤有机碳释放动态精度较差,且费时、耗钱、费力,运用模型模拟林地土壤碳释放的方法应用较广泛<sup>[19-21]</sup>。目前,模拟土壤碳动态的模型主要有 Century, Coup-Model, Q-Model, ROMUL, DECOMP 等<sup>[22]</sup>,但上述模型需要输入的信息较多,且部分信息难以获取。与上述模型相比,基于林地土壤碳动态是由凋落物中 4 类有机化合物在不同库间转化假设的 Yasso07 林地土壤碳分解模型,因其运行所需参数少且易获取、操作简便、估算土壤呼吸结果可靠,已在欧美得到广泛应用<sup>[23-24]</sup>。

我国在森林抚育中普遍的做法是间伐后将间伐残留物置于林地内,其虽能增加林地土壤肥力,但残留物堆积于林地且分解较慢,可增加林火风险。迄今虽已有一些单项措施与林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放关系的报道,但有关间伐强度和间伐残留物移除强度的综合影响了解不多。

本研究以秦岭中山地带分布广泛的松栎混交林为研究对象,应用 Yasso07 模型模拟林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放,运用二次通用旋转设计探讨不同间伐强度和间伐残留物移除强度对林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放的影响,确定 CO<sub>2</sub> 释放量最小条件下间伐强度和间伐残留物移除强度的最优组合,以期为以固碳为目的森林经营措施的制定提供依据。

<http://www.ecologica.cn>

## 1 研究区自然概况

试验在陕西秦岭森林生态系统国家野外科学研究所(33°26′N, 108°27′E)进行,该地位于秦岭南坡,地处北亚热带和暖温带的过渡带。海拔 1500—1700 m,研究区坡度多在 30°左右,年降水量 900—1200 mm,年蒸发量 800—950 mm,相对湿度 77.1%,1 月平均气温 -3.8℃,7 月平均气温 16.3℃,年均气温 9℃。土壤主要是沉积岩和变质岩母质上发育起来的山地棕壤,土层厚度在 60 cm 左右,土壤中砂砾、粉粒和粘粒所占比重较大,凋落物厚度 2—6 cm。研究区内的松栎混交林为天然次生林,平均林龄 42 a,现有林分中优势树种为油松(*Pinus tabulaeformis*)、华山松(*Pinus armandi*)和锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)林下植被发育良好。

## 2 研究方法

### 2.1 间伐试验设计

秦岭林区地形破碎复杂,难以满足随机区组和正交试验设计对试验小区重复数较多的要求。二次通用旋转设计因其需要实验次数较少、可对试验因子优化,寻求目标变量最优条件下控制因子最佳组合等优点广泛应用于科学实验中。

本研究在森林抚育设计中采用二次通用旋转设计<sup>[25-26]</sup>。

间伐试验设计中控制因子为间伐强度(%)和间伐残余物移除强度(%)。

$$\text{间伐强度}(\%) = \frac{\text{间伐木的总胸高断面积}}{\text{原有林分总胸高断面积}} \times 100\%$$

根据《森林抚育规程》GB/T(15781—2009)和《陕西省森林抚育规程》(2010),设置间伐强度上限为 25%。

在收获木材后,称取间伐残余物鲜重,将其按一定的比例(质量百分比)均匀铺于林地土壤表层,剩余部分移出林外,残余物的移除强度按下式计算:

$$\text{间伐残余物移除强度}(\%) = \frac{\text{残余物移除质量}}{\text{残余物总质量}} \times 100\%$$

通过软件 DPS v14.50 确定试验设计方案,每个控制因子(独立变量)共设  $-\gamma(-1.414)$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $1$  和  $\gamma(1.414)$  5 个水平(表 1) 9 个处理(表 2)。

变量代码通过下式计算获得:

$$\Delta x = \frac{(X_i - X_0)}{\Delta X_i}$$

式中  $x_i$  为控制因子的代码值,  $X_i$  是独立变量的实际值,  $X_0$  为独立变量实际值的中间值,  $\Delta x$  为步长变化值<sup>[27]</sup>。

表 1 试验设计因子水平

Table 1 Levels of factors of experimental design

变量 / % Variables	水平 Levels				
	$(-\alpha) -1.414$	$-1$	$0$	$1$	$(+\alpha) +1.414$
$X_1$	5	7.93	15	22.07	25
$X_2$	0	14.64	50	85.36	100

间伐试验设计方案如下(表 2)。

### 2.2 间伐作业

2012 年 8 月上旬,在秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站内,选取林龄、密度、地形因子、土壤条件等相近的松栎混交林为研究对象,根据二次回归通用旋转设计的要求,共选取 13 个试验小区,设 9 个处理,每个试验小区的面积为 20 m×20 m,同期开展本底调查,调查因子包括样地海拔、坡度、坡向,林分郁闭度、树种组成、树高和胸径等(表 3)。2012 年 8 月下旬开展间伐试验(表 4)。

表 2 DPS (Data Processing System) v14.50 运行的试验设计方案

Table 2 Layout of the experiment

样地号 Plot No.	处理 Treatment	变量代码 Variable code		样地号 Plot No.	处理 Treatment	变量代码 Variable code	
		$x_1$	$x_2$			$x_1$	$x_2$
1	I	1	1	2	II	1	-1
3	III	-1	1	4	IV	-1	-1
5	V	$-\gamma$	0	6	VI	$\gamma$	0
7	VII	0	$-\gamma$	8	VIII	0	$\gamma$
9	IX	0	0	10	IX	0	0
11	IX	0	0	12	IX	0	0
13	IX	0	0				

$x_1$ 代表间伐强度;  $x_2$ 代表间伐残留物移除强度

表 3 试验样地概况

Table 3 General information of plots

样地号 Plot No.	平均坡度 Gradient/( $^{\circ}$ )	伐前郁闭度 Canopy density before thinning/%	伐后郁闭度 Canopy density after thinning/%	伐前树种组成 Tree species composition before thinning	伐后树种组成 Tree species composition after thinning	土层厚度 Soil thickness/cm	凋落物年输入量 Yearly input of litters/( $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ )
1	35	75	72	7 油 2 华 1 栋	7 油 2 华 1 栋	30	0.275
2	30	80	73	5 油 2 华 2 栋 1 杂	4 油 3 华 2 栋 1 杂	45	0.236
3	30	80	72	7 油 2 华 1 栋	8 油 1 华 1 栋	40	0.315
4	30	80	73	6 油 2 华 2 栋	7 油 2 华 1 栋	50	0.341
5	25	85	81	4 油 3 华 3 栋	4 油 3 华 3 栋	46	0.279
6	30	80	70	7 华 2 栋 1 油	8 华 1 栋 1 油	35	0.296
7	30	75	73	7 华 2 油 1 栋	6 华 3 油 1 栋	40	0.248
8	30	90	81	5 华 2 油 2 栋 1 杂	6 华 1 油 2 栋 1 杂	44	0.266
9	25	90	84	7 华 2 油 1 栋	7 华 2 油 1 栋	33	0.307
10	30	80	72	8 油 1 华 1 栋	8 油 1 华 1 栋	38	0.341
11	30	90	83	6 油 2 华 2 栋	7 油 1 华 2 栋	41	0.331
12	25	80	72	6 油 2 栋 1 华 1 杂	7 油 1 栋 1 华 1 杂	45	0.298
13	28	80	73	8 油 1 栋 1 华	8 油 1 栋 1 华	45	0.320

表 4 间伐前后各树种密度

Table 4 Density of trees before and after thinning

样地号 Plot No.	伐前各树种密度 Density of each trees before thinning				伐后各树种密度 Density of each trees after thinning				株/ $\text{hm}^2$ Trees per	
	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	华山松 <i>P. armandi</i>	锐齿栎 <i>Q. Aliena var. acuteserrata</i>	其他 others	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	华山松 <i>P. armandi</i>	锐齿栎 <i>Q. Aliena var. acuteserrata</i>	其他 others	伐前总密度 Density of trees before thinning	伐后总密度 Density of trees after thinning
1	850	250	125	50	725	200	100	50	1775	1075
2	925	375	400	200	550	375	325	175	1900	1425
3	1250	375	125	50	1175	175	125	50	1800	1525
4	900	300	250	25	725	225	150	50	1475	1125
5	500	350	350	25	400	300	325	25	1275	1100
6	125	875	175	50	100	800	100	25	1225	1025
7	275	925	150	50	275	750	100	50	1400	1175
8	325	825	300	175	150	700	250	125	1625	1275
9	350	1275	175	50	300	1075	125	25	1850	1525

<http://www.ecologica.cn>

续表

样地号 Plot No.	伐前各树种密度 Density of each trees before thinning				伐后各树种密度 Density of each trees after thinning				株/hm <sup>2</sup> Trees per	
	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	华山松 <i>P. armandi</i>	锐齿栎 <i>Q. Aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	其他 others	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	华山松 <i>P. armandi</i>	锐齿栎 <i>Q. Aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	其他 others	伐前总密度 Density of trees before thinning	伐后总密度 Density of trees after thinning
10	1225	175	150	75	1050	150	150	75	1625	1325
11	925	325	300	75	875	150	275	50	1625	1350
12	875	150	325	150	850	125	125	125	1500	1225
13	1375	150	150	50	1175	125	100	25	1725	1425

### 2.3 凋落物回归动态

2012年8月根据对角线法在13个试验小区内各布设5个1 m×1 m的凋落物收集框,2012年9月至2014年9月每月(除下雪封山)收集凋落物框中的凋落物,带回实验室,按树种区分叶凋落物,在70℃下烘至恒重,称其质量<sup>[28]</sup>。

### 2.4 凋落物化学组分及测定

Yasso07模型中凋落物4类化合物分别为酒精溶解性化合物(ESC);水溶性化合物(WSC);酸溶性化合物(ASC);不溶性化合物(NSC)<sup>[29]</sup>,测定流程如下<sup>[30]</sup>:

取1 g叶凋落物样品于70℃下烘至恒重,粉碎,过0.149 mm筛,用纯CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>溶液提取16—24 h,过滤得残渣1,样品质量与残渣1质量之差为ESC质量;将残渣1用100℃蒸馏水提取1 h,称重得残渣2,残渣1与残渣2质量之差为WSC质量;将残渣2用72%硫酸30℃恒温水浴提取1 h,然后稀释酸的浓度至2.5%,在120℃下提取1 h,得残渣3,残渣2与残渣3质量之差为ASC质量;将残渣3在450℃灼烧8 h,得残渣4(灰分)质量,残渣3与残渣4质量之差为ASC质量。

各组分质量与样品质量之比为其含量(%)。

### 2.5 Yasso07模型简介及输入参数

Yasso07是模拟土壤碳循环模型,比旧版Yasso有所改进,基于大数据模拟和更先进的数学方法,可用于估算土壤有机碳库的变化和土壤呼吸,模型操作过程详见参考文献<sup>[29-30]</sup>。凋落物四类化合物含量输入值根据各树种凋落物所占质量的百分比将其测定含量加权平均,年降雨量和年均温等数据来自陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站的气象站。凋落物质量和凋落物4类化合物含量以值对形式输入,凋落物质量、凋落物4类化合物含量、年降雨量和年均温的输入以2012年为基准。在Yasso07模型参数输入中以年尺度为步长,数据以矩阵形式输出<sup>[29]</sup>。

### 2.6 数据处理

采用SPSS 17.0(SPSS Inc.,USA)软件中的单因素方差分析(one-way ANOVA)判定不同树种凋落物化学组分的差异显著性,凋落物化学组分含量的数据为“平均值±标准差”;

采用DPS 7.05软件,以间伐强度和间伐残留物移除强度为自变量,以林地土壤CO<sub>2</sub>释放量为因变量进行模型拟合。

## 3 结果与分析

### 3.1 凋落物化学组分

不同树种同类化合物含量除华山松和油松的醇溶性化合物(ESC)和水溶性化合物(WSC)含量差异均不显著、华山松和锐齿栎的酸溶性化合物(ASC)含量之间差异不显著外,不同树种间其余化合物含量之间差异均显著。针叶树种(华山松、油松)的醇溶性化合物(ESC)含量和水溶性化合物(WSC)含量低于阔叶树种(锐齿栎),而其不溶性化合物(NSC)含量高于阔叶树种(表5)。针叶树种叶中木质素含量较高,阔叶树种叶中可

溶性脂肪、单糖和水溶性酚类物质含量较高; 而不溶性化合物主要由木质素构成, 醇溶性化合物主要由可溶性脂肪、色素等构成, 水溶性化合物主要由单糖和水溶性酚类物质构成<sup>[29]</sup>。

同一树种不同化合物含量之间差异均显著。针叶树种(华山松、油松)醇溶性化合物(ESC)含量相比其他化合物较低, 酸溶性化合物(ASC)含量最高; 阔叶树种(锐齿栎)不溶性化合物(NSC)含量最低, 酸溶性化合物(ASC)含量最高(表5)。针叶树种叶中纤维素、半纤维素和木质素含量较高, 阔叶树种叶中可溶性脂肪、色素等含量较高; 而酸溶性化合物由纤维素和半纤维素构成, 醇溶性化合物主要由可溶性脂肪、色素等构成<sup>[29]</sup>。

表5 叶凋落物化学组分

Table 5 Chemical composition of litter leaf

树种 Tree species	醇溶性 ESC	水溶性 WSC	酸溶性 ASC	不溶性 NSC
华山松 <i>P. armandi</i>	12.50±0.41Aa	15.31±0.65Ba	43.34±0.32Db	28.86±0.63Cb
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	12.23±0.55Aa	15.07±0.62Ba	41.78±0.49Da	30.92±1.08Cc
锐齿栎 <i>Q. Aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	19.89±0.40Bb	25.22±0.42Cb	44.49±0.51Db	10.41±0.19Aa

ESC: 醇溶性化合物 Ethanol soluble compound, WSC: 水溶性化合物 Water soluble compound, ASC: 酸溶性化合物 Acid soluble compound, NSC: 不溶性化合物 Non-soluble compound; 行中大写字母相同表示同一树种不同化合物含量之间差异不显著( $P>0.05$ ), 反之差异显著( $P<0.05$ ); 列中小写字母相同表示不同树种同一化合物含量之间差异不显著( $P>0.05$ ), 反之差异显著( $P<0.05$ )

### 3.2 间伐对林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放的影响

运用 Yasso07 模型模拟了间伐后 1a(2013 年)、间伐后 2a(2014 年)林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放动态, 结果表明: 除处理 III 2014 年林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量略低于 2013 年外, 其余处理 2014 年林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量均高于 2013 年, 其增幅介于 0.154—1.292 Mg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 间伐增加了林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放(图 1)。间伐降低了林内郁闭度, 提高了林内透光性, 林地表层土壤温度升高, 有利于土壤微生物活动, 加快了枯落物分解, 林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量增大<sup>[31-33]</sup>。

### 3.3 模型拟合

为进一步探讨抚育间伐对林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放的影响, 以 2013 年和 2014 年林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量的均值为因变量, 以间伐强度和间伐残留物移除强度为自变量进行模型拟合<sup>[34]</sup>, 结果如下:

$$Y = 1539.83 + 74.74x_1 - 38.45x_2 + 103.96x_1^2 + 139.27x_2^2 + 15.32x_1x_2 \quad (1)$$

式中,  $Y$  为不同抚育强度下林地土壤 CO<sub>2</sub> 年释放量;  $x_1$ ,  $x_2$  分别表示间伐强度和间伐残留物移除强度的编码水平。经对模型进行统计检验(表 6), 回归模型中失拟项  $F$  检验( $F=0.21996$ )不显著, 表明非控制因素对试验结果影响不大; 而回归项( $F=82.19>F_{0.01}$ )达 0.01 显著水平, 说明回归模型拟合程度高, 试验因素与林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放间存在真实的回归关系。

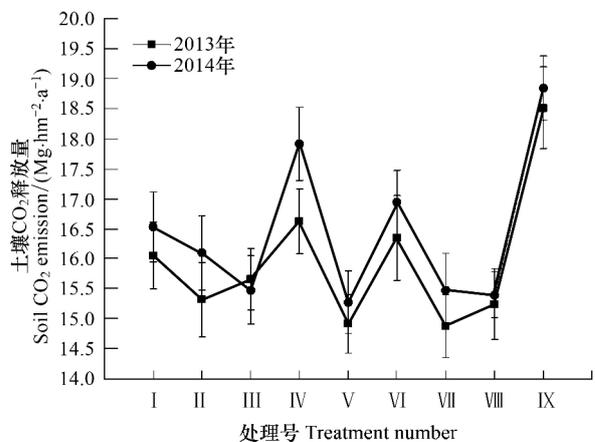
剔除模型中不显著项( $P>0.01$ )(表 6), 得如下优化方程:

$$Y = 1539.83 + 74.74x_1 - 38.45x_2 + 103.96x_1^2 + 139.27x_2^2 \quad (2)$$

式中, 各变量含义同(1)。

为客观评价各因子对林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放的影响, 根据(3)式分别求两因子对林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放的贡献率, 采用对拟合模型中与某因子相关且  $F>1$  的项求贡献率来衡量该因子对因变量的影响。公式如下<sup>[35]</sup>:

<http://www.ecologica.cn>

图1 间伐后1年、间伐后2年土壤 CO<sub>2</sub> 释放动态Fig.1 Variation of CO<sub>2</sub> emission about a year to two years after thinning

$$\Delta j = S_j + \frac{1}{2} \sum S_{ij} + S_{jj} \tag{3}$$

式中,  $S = 1 - \frac{1}{F}$ ,  $S_j$ 代表一次项,  $S_{ij}$ 代表交互项,  $S_{jj}$ 代表二次项。

结果表明: 间伐强度(1.98) > 间伐残留物移除强度(1.95), 间伐强度是影响林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放的主导因子。

表 6 回归模拟的回归系数、标准误及方差分析

Table 6 The regression coefficient, standard error and variance analysis of regression simulate

参数 Parameter	平方和 Sum of square	自由度 <i>df</i>	均方 Mean square	偏相关 Partial correlations	<i>F</i>	<i>P</i>
$x_1$	44690.1594	1	44690.1594	0.9564	75.1283	0.0001
$x_2$	11825.1178	1	11825.1178	-0.86	19.8791	0.0029
$x_1^2$	75189.7436	1	75189.7436	0.9734	126.401	0.0001
$x_2^2$	134920.5307	1	134920.5307	0.9849	226.814	0.0001
$x_1x_2$	939.116	1	939.116	0.429	1.5787	0.2492
回归 Regression	244471.5053	5	48894.3	$F_2 = 82.19587$		0.0001
剩余 Residue	4163.9577	7	594.8511			
失拟 Lack of fit	589.6592	3	196.5531	$F_1 = 0.21996$		0.8796
误差 Error	3574.2985	4	893.5746			
总和 Sum	248635.463	12				

间伐强度( $x_1$ ) 和间伐残留物移除强度( $x_2$ ) 单因子效应分析如下:

当间伐强度  $x_1 \in [-1.414, -0.377]$  时, 即间伐强度从 5.00%—12.38% 时, 土壤 CO<sub>2</sub> 释放量随间伐强度增加而减小; 当间伐强度  $x_1 \in [-0.377, 1.414]$  时, 即间伐强度从 12.38%—25.00% 时, 土壤 CO<sub>2</sub> 释放量随间伐强度增加而增大; 当间伐强度  $x_1 = -0.377$  时, 即间伐强度为 12.38% 时, 林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量最小, 为 15.264 Mg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (图 2)。

当间伐残留物移除强度  $x_2 \in [-1.414, -0.094]$  时, 即间伐残留物移除强度从 0.00%—53.18% 时, 土壤 CO<sub>2</sub> 释放量随间伐残留物移除强度增加而减小; 当间伐残余物移除强度  $x_2 \in [-0.094, 1.414]$  时, 即间伐残留物移除强度从 53.18%—100.00% 时, 土壤 CO<sub>2</sub> 释放量随间伐残留物移除强度增加而增大; 当间伐强度  $x_2 = 0.094$  时, 即间伐强度为 53.18% 时, 林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量最小, 为 15.375 Mg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (图 3)。

利用间伐措施和林地 CO<sub>2</sub> 释放二次模型, 在变量设计范围  $[-1.414 \leq X_i \leq 1.414]$  内, 模拟 2 个变量因子 5 种水平的全部组合方案, 选取林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量最小的方案, 通过频次分析计算选取方案中各抚育因子编码水平出现的平均值及其 95% 置信区间, 确定相应的抚育措施范围。结果表明: 当间伐强度为 12.38%, 间伐残留物移除强度为 53.18% 时, 林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量最小, 为 15.318 Mg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。

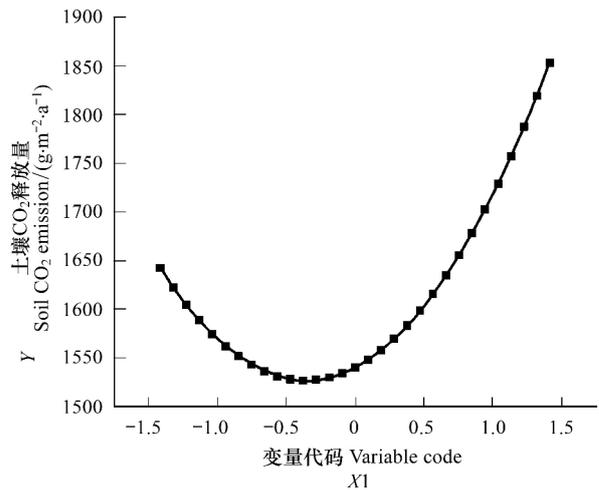


图 2 间伐强度对林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放的影响

Fig. 2 Effects of thinning intensity on soil CO<sub>2</sub> emission in the forest

## 4 讨论

### 4.1 凋落物化学组分对林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放的影响

Yasso07 模型操作手册附录中列出了部分欧美树种凋落物化学组分的含量<sup>[29]</sup>, 不同树种凋落物中的 4 类化合物含量差异较大, 即使同一属的树种, 其凋落物化学组分的含量也明显不同。以叶凋落物为例, 欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) ESC 的含量分别为海岸松 (*Pinus pinaster*) 的 10.79 倍、意大利伞松 (*Pinus pinea*) 的 8.56 倍、斑克松 (*Pinus banksiana*) 的 7.24 倍。Sariyildiz 等<sup>[36]</sup> 和 Valachovic 等<sup>[37]</sup> 分别研究了分布于土耳其东北部的欧洲栎 (*Quercus robur*) 和美国俄勒冈西部的俄州栎 (*Quercus garryana*) 的凋落物化学组分, 结果表明俄州栎凋落物中 ASC 含量为欧洲栎的 1.54 倍, 而欧洲栎凋落物中的 NSC 含量为俄州栎的 5.41 倍。

为进一步了解树种凋落物化学组分对林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量的影响, 运用 2012—2013 年凋落物输入量、年均温和降水量数值, 分别比较本研究凋落物化学组分实测值 (情景 1) 和模型默认值 (情景 2) 模拟两种情景下林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量。结果表明: 凋落物化学组分对 Yasso07 模型模拟林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放有显著影响。在不同处理中, 情景 1 下林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量均大于情景 2, 其差值介于 1.90—3.50 Mg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 差值占两种模拟结果的比例分别为 12.34%—19.54% 和 14.07%—24.28% (图 4)。

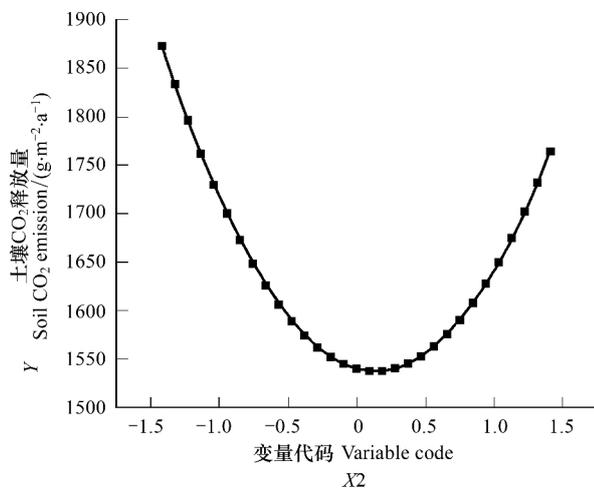


图 3 间伐残留物移除强度林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放的影响

Fig.3 Effects of residue removed intensity on soil CO<sub>2</sub> emission in the forest

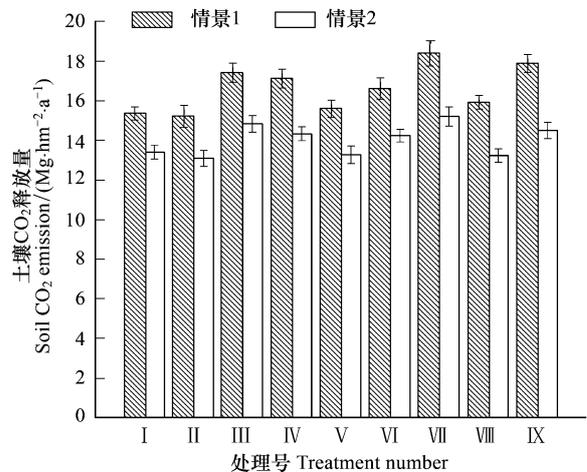


图 4 两种方法模拟土壤 CO<sub>2</sub> 释放对比

Fig.4 Comparison of Soil CO<sub>2</sub> emission in two simulating method

凋落物的树种生物学特性不同, 导致凋落物的化学组分含量不同<sup>[36]</sup>。凋落物的化学组成, 尤其是凋落物中 N 含量和木质素量是影响凋落物分解速率的重要原因, N 含量和木质素含量越高, 凋落物分解越缓慢<sup>[38-39]</sup>。酒精溶解性化合物 (ESC) 主要由可溶性脂肪、色素和油组成<sup>[29]</sup>, N 含量相对较低, 可能造成有较高含量酒精溶解性化合物凋落物分解较快。酸溶性化合物 (ASC) 主要由纤维素和半纤维素组成<sup>[29]</sup>, 其分解需要纤维素酶等特殊条件, 由纤维素和半纤维素构成的植物叶片束状 (针叶)、网状结构 (阔叶) 可能有延缓凋落物分解的作用, 因此, 较多的酸溶性化合物可能会减缓凋落物的分解。不溶性化合物 (NSC) 主要是木质素<sup>[29]</sup>, Caroline 等<sup>[40]</sup> 研究表明凋落物分解过程中凋落物抵抗性的增加可能是源于难溶的和不规则的高分子结构 (包括角质、木质素和变性的木质素等) 的富集, 较高的木质素含量增加了凋落物对分解的抵抗性。

不同树种凋落物化学组分不同导致其分解机理和速率产生差异, 进而影响了林地 CO<sub>2</sub> 释放。因此, 在运用 Yasso07 模型模拟林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放过程中, 应根据研究区域对树种凋落物化学组分进行测定。

## 4.2 间伐对林地土壤 CO<sub>2</sub>释放的影响

Dannenmann 等<sup>[12]</sup>的研究则表明间伐后第 2 年土壤呼吸速率高于间伐后第 1 年,此结果和本研究一致,其原因可能在于随着间伐时间推移,微生物活性增加,根系生物量增大,从而造成养分的积累,为微生物的活动提供了良好条件<sup>[10-11]</sup>,间伐降低了林分郁闭度,改善了林内光照条件,增加了林内温度<sup>[33]</sup>和林地土壤含水量<sup>[34]</sup>,加快了枯落物分解,提高了土壤有机质含量<sup>[35]</sup>,因而增加了林地土壤 CO<sub>2</sub>释放。本研究中,在不同处理间伐措施下通过改变树种凋落物的输入量,改变了 Yasso07 模型中凋落物输入质量和凋落物化学组分输入含量,进而影响了模拟林地土壤 CO<sub>2</sub>释放。

Campbell 等<sup>[8]</sup>的研究表明间伐对内华达山脉北部美国黄松林土壤 CO<sub>2</sub>释放的影响不显著, Misson 等<sup>[6]</sup>研究发现间伐比未间伐土壤呼吸速率降低 13%,并推断林地呼吸速率的降低是根系呼吸减少、土壤有机质增加和土壤温度及水分的细微变化所致,与本研究结果不同。

## 4.3 本研究不足

由于秦岭山地冬季、初春常积雪,试验林区封山,导致休眠季土壤呼吸的测定不能正常进行,因此无法准确获取全年碳释放数据,这是将 Yasso07 模型引入本区的重要原因,然而模拟精度未能得到验证。在今后的工作中,希望能采取科学有效措施解决以上问题。

## 5 结论

凋落物化学组分对林地土壤 CO<sub>2</sub>释放有显著的影响。在两个控制因子中,间伐强度是影响林地土壤 CO<sub>2</sub>释放的主导因子,间伐后林地土壤 CO<sub>2</sub>释放量有升高趋势。在本区松栎混交林的抚育间伐作业中,宜采用 12.38%的间伐强度和 53.18%的间伐残留物移除强度,此组合时林地土壤 CO<sub>2</sub>释放量最小。基于短期研究,提出了间伐措施对林地土壤 CO<sub>2</sub>释放量最小的最优组合,抚育措施对林地土壤 CO<sub>2</sub>释放的长期影响尚需进一步研究。

## 参考文献(References):

- [1] 罗菊春. 抚育改造是森林生态系统经营的关键性措施. 北京林业大学学报, 2006, 28(1): 121-124.
- [2] 段劫, 马履一, 贾黎明, 贾忠奎, 公宁宁, 车文瑞. 抚育间伐对侧柏人工林及林下植被生长的影响. 生态学报, 2010, 30(6): 1431-1441.
- [3] 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 郭文福, 卢立华, 温远光. 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响. 生态学报, 2013, 33(19): 6154-6162.
- [4] 李荣, 张文辉, 何景峰, 周建云. 不同间伐强度对辽东栎林群落稳定性的影响. 应用生态学报, 2011, 22(1): 14-20.
- [5] Masyagina O V, Prokushkin S G, Koike T. The influence of thinning on the ecological conditions and soil respiration in a larch forest on Hokkaido Island. *Eurasian Soil Science*, 2010, 43(6): 693-700.
- [6] Misson L, Tang J W, Xu M, McKay M, Goldstein A. Influences of recovery from clear-cut, climate variability, and thinning on the carbon balance of a young ponderosa pine plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130(3/4): 207-222.
- [7] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, Kowalski A S, Buchmann N, Epron D, Pilegaard K, Kutsch W, Longdoz B, Grünwald T, Montagnani L, Dore S, Rebmann C, Moors E J, Grelle A, Rannik Ü, Morgenstern K, Oltechev S, Clement R, Guðmundsson R, Minerbi S, Berbigier P, Ibrom A, Moncrieff J, Aubinet M, Bernhofer C, Jensen N O, Vesala T, Granier A, Schulze E D, Lindroth A, Dolman A J, Jarvis P G, Ceulemans R, Valentini R. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 269-278.
- [8] Campbell J, Alberti G, Martin J, Law B E. Carbon dynamics of a ponderosa pine plantation following a thinning treatment in the northern Sierra Nevada. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(2): 453-463.
- [9] Sullivan B W, Kolb T E, Hart S C, Kaye J P, Dore S, Montes-Helu M. Thinning reduces soil carbon dioxide but not methane flux from southwestern USA ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(12): 4047-4055.
- [10] Tian D L, Yan W D, Fang X, Kang W X, Deng X W, Wang G J. Influence of thinning on soil CO<sub>2</sub> efflux in Chinese fir plantations. *Pedosphere*, 2009, 19(3): 273-280.
- [11] Ryu S R, Concilio A, Chen J Q, North M, Ma S Y. Prescribed burning and mechanical thinning effects on belowground conditions and soil

- respiration in a mixed-conifer forest, California. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257( 4): 1324–1332.
- [12] Dannenmann M, Gasche R, Ledebuhr A, Holst T, Mayer H, Papen H. The effect of forest management on trace gas exchange at the pedosphere-atmosphere interface in beech (*Fagus sylvatica* L.) forests stocking on calcareous soils. *European Journal of Forest Research*, 2007, 126( 2): 331–346.
- [13] 田军, 毛波, 朱玉杰, 白永清. 抚育间伐对大兴安岭用材林生态经营的影响. *东北林业大学学报*, 2014, 42( 8): 61–64.
- [14] 郭辉, 董希斌, 姜帆. 采伐强度对小兴安岭低质林分土壤碳通量的影响. *林业科学*, 2010, 46( 2): 110–115.
- [15] 李娇, 尹春英, 周晓波, 魏宇航, 高巧, 刘庆. 施氮对青藏高原东缘窄叶鲜卑花灌丛土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2014, 34( 19): 5558–5569.
- [16] 吴迪, 张蕊, 高升华, 付晓, 邓红兵, 邵国凡, 张旭东. 模拟氮沉降对长江中下游滩地杨树林土壤呼吸各组分的影响. *生态学报*, 2015, 35( 3): 717–724.
- [17] Liski J, Palosuo T, Peltoniemi M, Sievänen R. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling*, 2005, 189( 1/2): 168–182.
- [18] Post W M, Izaurralde R C, Mann L K, Bliss N. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. *Climatic Change*, 2001, 51( 1): 73–99.
- [19] Repo A, Känkänen R, Tuovinen J P, Antikainen R, Tuomi M, Vanhala P, Liski J. Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. *Global Change Biology Bioenergy*, 2012, 4( 2): 202–212.
- [20] Peltoniemi M, Thuring E, Ogle S, Palosuo T, Schrupf M, Wutzler T, Butterbach-Bahl K, Chertov O, Komarov A, Mikhailov A, Gärdenäs A, Perry C, Liski J, Smith P, Mäkipää R. Models in country scale carbon accounting of forest soils. *Silva Fennica*, 2007, 41( 3): 575–602.
- [21] Mäkipää R, Häkkinen M, Muukkonen P, Peltoniemi M. The costs of monitoring changes in forest soil carbon stocks. *Boreal Environment Research*, 2008, 13( Suppl. B): 120–130.
- [22] Tuomi M, Rasinmäki J, Repo A, Vanhala P, Liski J. Soil carbon model Yasso07 graphical user interface. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26( 11): 1358–1362.
- [23] Tuomi M, Thum T, Järvinen H, Fronzek S, Berg B, Harmon M, Trofymow J A, Sevanto S, Liski J. Leaf litter decomposition—Estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling*, 2009, 220( 23): 3362–3371.
- [24] Tuomi M, Laiho R, Repo A, Liski J. Wood decomposition model for boreal forests. *Ecological Modelling*, 2011, 222( 3): 709–718.
- [25] 程仕平, 徐慧, 王德志, 王光君, 吴壮志. 基于二次通用旋转组合设计的 MoO<sub>2</sub> 氢还原工艺优化研究. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36( 11): 1933–1936.
- [26] 侯琳, 宋西德, 罗伟祥. 银杏—黄豆兼作模式研究. *河北林果研究*, 1999, 14( 1): 45–50.
- [27] Tang J, Qi Y, Xu M, Misson L, Goldstein A H. Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada. *Tree Physiology*, 2005, 25: 57–66.
- [28] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 付甜, 封晓辉. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系. *生态学报*, 2012, 32( 3): 852–862.
- [29] Tuomi M, Thum T, Järvinen H, Fronzek S, Berg B, Harmon M, Trofymow J A, Sevanto S, Liski J. Leaf litter decomposition—estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling*, 2009, 220( 23): 3362–3371.
- [30] Ryan M G, Melillo J M, Ricca A. A comparison of methods for determining proximate carbon fractions of forest litter. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20( 2): 166–171.
- [31] 胡建伟, 朱成秋. 抚育间伐对森林环境的影响. *东北林业大学学报*, 1999, 27( 3): 65–67.
- [32] 郭蓓, 刘勇, 李国雷, 甘敬, 徐扬. 飞播油松林地土壤酶活性对间伐强度的响应. *林业科学*, 2007, 43( 7): 128–133.
- [33] 陈雪, 马履一, 贾忠奎. 间伐对森林土壤影响的研究进展. *中国水土保持*, 2012, ( 9): 60–63.
- [34] 袁志发, 贫海燕. 试验设计与分析. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2007: 252–254.
- [35] 孙爱根. 栽培因子对小麦纹枯病的综合效应及高产控病技术研究. *安徽农业大学学报*, 2002, 29( 4): 355–358.
- [36] Sariyildiz T, Anderson J M, Kucuk M. Effects of tree species and topography on soil chemistry, litter quality, and decomposition in Northeast Turkey. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37( 9): 1695–1706.
- [37] Valachovic Y S, Caldwell B A, Cromack Jr K, Griffiths R P. Leaf litter chemistry controls on decomposition of Pacific Northwest trees and woody shrubs. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34( 10): 2131–2147.
- [38] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133( 1/2): 13–22.
- [39] 廖利平, 马越强, 汪思龙, 高洪, 于小军. 杉木与主要阔叶造林树种叶凋落物的混合分解. *植物生态学报*, 2000, 24( 1): 27–33.
- [40] Preston C M, Nault J R, Trofymow J A. Chemical changes during 6 years of decomposition of 11 litters in some Canadian forest sites. Part 2. <sup>13</sup>C abundance, solid-state <sup>13</sup>C NMR spectroscopy and the meaning of "Lignin". *Ecosystems*, 2009, 12( 7): 1078–1102.