

# 不同营林措施对马尾松林土壤呼吸影响

雷 蕾<sup>1,2</sup>, 肖文发<sup>1,2</sup>, 曾立雄<sup>1,2\*</sup>, 黄志霖<sup>1,2</sup>, 高尚坤<sup>1,2</sup>, 谭本旺<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林生态环境重点实验室,北京 100091; 2. 湖北秭归三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,湖北 宜昌 443631; 3. 湖北省秭归县林业局,湖北 宜昌 443631)

**摘要:**以三峡库区马尾松飞播林为研究对象,针对不同营林措施:除灌(清除所有除灌产生的枝叶)、采伐I(采伐强度15%,采伐树干,并未对枝叶进行清除)、采伐II(采伐强度70%,采伐剩余物处理同采伐I)、对照,采用LI-8100土壤CO<sub>2</sub>通量测定系统对其土壤呼吸速率进行为期1年的连续观测,分析了不同营林措施对于土壤呼吸的影响以及不同营林措施下土壤呼吸产生差异的原因。结果显示:年土壤呼吸速率均值除灌( $1.82 \pm 0.07 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) < 对照( $2.18 \pm 0.05 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) < 采伐I( $2.37 \pm 0.07 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) < 采伐II( $2.86 \pm 0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );采伐强度与土壤呼吸速率增值呈正比;不同营林措施与对照土壤呼吸速率均在夏季生长旺盛期7—8月达到最大值;高强度的采伐显著提高了土壤温度与湿度,对照、除灌、采伐I、采伐II土壤呼吸敏感性指数Q<sub>10</sub>值依次为:  $2.18 \pm 1.09$ 、 $1.65 \pm 0.07$ 、 $2.20 \pm 0.09$ 、 $2.36 \pm 0.09$ 。

**关键词:**马尾松;土壤呼吸速率;除灌;采伐;土壤温度;土壤湿度

中图分类号:S791.248

文献标识码:A

## Effect of Forest Management on Soil Respiration of *Pinus massoniana*

LEI Lei<sup>1,2</sup>, XIAO Wen-fa<sup>1,2</sup>, ZENG Li-xiong<sup>1,2</sup>, HUANG Zhi-lin<sup>1,2</sup>, GAO Shang-kun<sup>1,2</sup>, TAN Ben-wang<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Beijing 10009, China; 2. National Forest Ecosystem Station of Three Gorges Reservoir in Zigui County, Yichang 443639, Hubei, China; 3. Forestry Bureau of Zigui County, Yichang 443639, Hubei, China)

**Abstract:** Aerially seeded *Pinus massoniana* forest in the Three Gorges Reservoir area with different management treatments, including shrubs-cutting plus residue removal, harvest I (cutting intensity 15%, stem-only harvesting without residue removal), harvest II (cutting intensity 70%, harvest type as harvest I) and the control, were surveyed to measure the total soil respiration rates over a year by using LI-8100 system. The influence of various forest managements on soil respiration was discussed and the reasons causing the variability of soil respiration were analyzed. The results showed that: the annual soil respiration of forests with different treatments was  $1.82 \pm 0.07 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (shrubs-cutting),  $2.18 \pm 0.05 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (control),  $2.37 \pm 0.07 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (harvest I), and  $2.86 \pm 0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (harvest II). The harvest intensity was positively related to soil respiration increment; soil respiration of all the harvest treatment reached the maximum in July and August. High intensity improved the soil temperature and moisture. The temperature sensitivity indexes of the control, shrubs-cutting, harvest I, and harvest II were  $2.18 \pm 1.09$ ,  $1.65 \pm 0.07$ ,  $2.20 \pm 0.09$  and  $2.36 \pm 0.09$  respectively.

**Key words:** *Pinus massoniana*; soil respiration; shrubs-cutting; harvest; soil temperature; soil moisture

收稿日期:2014-07-31

基金项目:林业公益性行业科研专项“典型森林土壤碳储量分布格局及变化规律研究”(项目编号:201104008)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“典型森林土壤有机碳空间分布格局及其制图”(项目编号:CAFRIFFP201101)

作者简介:雷蕾,在读博士(1986—),主要研究方向为森林生态系统土壤碳循环。E-mail:lei19860123@163.com

\* 通讯作者: E-mail: zlxcaf@163.com

森林土壤在维持全球碳平衡以及应对气候变化起着关键的作用<sup>[1-2]</sup>,森林生态系统碳排放中,30%~80%源于土壤的呼吸作用<sup>[3]</sup>。然而,土壤呼吸的组成的复杂性,如根呼吸、菌根呼吸、微生物呼吸<sup>[4-5]</sup>,以及过程的复杂性,受到土壤温度、湿度、植物组成、微生物活性、土壤有机质含量等综合作用,导致土壤呼吸具有极大的变异性<sup>[6-8]</sup>。除自然因素外,土壤呼吸的时空变异性同时受到人类干扰和森林管理措施的影响。森林管理措施如间伐、火烧、施肥等,可能通过改变地上植被组成、林内光照、土壤水分温度等进而影响森林土壤碳排放,近些年来许多学者针对森林采伐与土壤碳排放进行了大量研究,但在不同的森林生态环境下土壤呼吸对于森林采伐的响应是不同的<sup>[9-11]</sup>,仍需对特定区域不同森林经营方式下森林土壤呼吸进行研究,以定量预测森林经营管理对于碳循环的影响进而制定出合理的森林经营方案。

马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)是中国南方主要造林树种<sup>[12]</sup>,也是三峡库区分布面积最大的森林类型<sup>[13]</sup>。目前关于中国马尾松林土壤呼吸较少,且主要集中于未受人为管理干扰的情况<sup>[14]</sup>,同时,在三峡库区马尾松林人为管理干扰后土壤呼吸的变化尚未见报道。本研究以三峡库区人为管理干扰后马尾松飞播林为研究对象,对不同营林措施下总土壤呼吸速率及5 cm深处土壤温湿度进行连续观测,探讨不同营林措施下马尾松林土壤呼吸速率变化情况以及影响土壤呼吸速率的主要因子,旨在为本区域科学经营马尾松林提供理论支撑以促进马尾松林固碳效益,为科学评价营林措施对于森林碳吸存的影响提供基础数据。

## 1 研究区概

研究地点位于湖北省秭归县三峡库区九岭头林场,地理位置 30° 59' N, 110° 47' E, 海拔 156 ~ 2 030.6 m, 年均气温 16.9℃, 年降水量 1 000 ~ 1 250 mm, 多集中于 4 ~ 9 月, 属于亚热带大陆性季风气候。土壤类型以黄壤、黄棕壤为主<sup>[15]</sup>。调查样地内马尾松林为 70 年代飞播造林, 样地内林木分布均匀, 马尾松为主要优势种, 盖度达 80%。林下灌木主要有火棘(*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) Li)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、木姜子(*Litsea pungens* Hemsl.)等, 草本主要有狗脊(*Woodwardia japonica* (L. F.) Sm.)、苔草(*Carex doniana* Spreng)、三脉紫菀(*Aster ageratoides* Turcz.)、中日金星蕨(*Parathelypteris nipponica* (Franch. et Sav.) Ching)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

样地设置于三峡库区九岭头林场经营后的马尾松飞播林内, 样地内采用典型采样法, 于 2013 年 9 月按照不同营林措施, 分别设立 3 块 20 m × 20 m 固定样地, 采取除灌和采伐进行处理。除灌(林床清理)(SM)主要是清除样地内所有灌木, 并对灌木清理后的剩余物进行仔细清除; 采伐 I(H1)即采伐样地内的非马尾松, 主要为后期更新的阔叶树种, 强度为 15%(按断面积计算); 采伐 II(H2)是清除样地内平均胸径以上马尾松, 强度为 70%。伐木作业采用人力油锯伐木, 仅对采伐的树干进行了移除, 不对采伐产生的剩余物如枝叶等进行清除。同时在固定样地相邻处, 土壤条件基本相同的林地设置对照(CK)固定样地 3 块(20 m × 20 m)。各种经营措施在 2013 年 10 月中旬完成(表 1)。

表 1 马尾松飞播林不同营林措施后样地概况

营林措施	坡度/°	坡向	海拔/m	平均胸径/cm	密度/ (株数·hm <sup>-2</sup> )	表层土壤 (0~20 cm) pH	土壤厚度/ cm	月凋落物 量/(g·m <sup>-2</sup> )
对照(CK)	34	西北	1 225	11.1	1 688	5.50	120	46.53
除灌(SM)	35	西北	1 240	12.5	1 480	5.49	120	34.30
采伐 I(H1)	33	西北	1 200	17.74	524	5.49	120	39.03
采伐 II(H2)	33	西北	1 226	9.36	908	5.34	120	7.57

### 2.2 土壤呼吸及土壤温湿度测定

在对照与营林措施设定的固定样地内分别随机设置 5 个观测小区(1 m × 1 m), 每个小区内各布设 1 个直径 20 cm、深度 8 cm 的聚氯乙烯(PVC, 5 cm

埋入地下)土壤环置放于土壤表层内。土壤呼吸由 Li-8100 便携式土壤呼吸仪测得。同时用 Li-8100 自带的土壤温湿度探头测定 5 cm 土壤的水分以及温度, 每个土壤呼吸圈附近测定 3 次取平均值。测定

时间为2013年11月—2014年10月,避开雨天测定,生长季(3月—9月)于每月月中和月底各测定1次,共测定2次,非生长季每月于月底测定1次,每次测定时间为上午9点至11点;其中,2014年1月、2月由于下雪封路未能进行测定,4月生长季由于连续降雨,仅测定1次。

### 2.3 数据统计分析

所有的统计分析都在 SPSS 19 软件中进行,用 Repeated measures ANOVA 检验土壤呼吸季节变化的显著性,用 SigmaPlot 11.0 软件作图。月土壤呼吸速率是每月测量值的平均值,年土壤呼吸速率是全年每月测量的平均值。两个参数指数方程用于描述土壤呼吸与土壤表层温度的关系(方程(1)),同时通过方程(2)估计温度敏感性系数  $Q_{10}$  ([3])

$$Rs = ae^{bT} \quad (1)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

式中,  $Rs$  为测定的土壤呼吸速率 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $T$  为表层 5 cm 土壤温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $a$  是温度为  $0^{\circ}\text{C}$  的土壤呼吸,  $b$  为温度反应系数。

$Q_{10}$  的标准误 (S. E. ( $Q_{10}$ )) 用下式(方程(3))计算(式中  $b$  同上方程(2)为温度反应系数, S. E. ( $b$ ) 为温度反应系数  $b$  的标准误):

$$\text{S. E. } (Q_{10}) = Q_{10} \times 10 \times \text{S. E. } (b) \quad (3)$$

土壤呼吸速率与土壤湿度之间的关系通过二次回归方程(4)计算:

$$Rs = b_1 + b_2 \times W + b_3 \times W^2 \quad (4)$$

式中,  $W$  为土壤体积含水量 (%),  $b_1, b_2, b_3$  为方程拟合参数。

为检验土壤湿度与土壤温度对于土壤呼吸速率的叠加效应,将土壤温度、土壤含水量及其乘积作为独立变量引入到对数变换后的方程(1)中,如下式所示:

$$\ln Rs = c_1 + c_2 \times T + c_3 \times W + c_4 \times T \times W \quad (5)$$

式中,  $T, W$  如上所述,  $c_1, c_2, c_3, c_4$  为方程拟合参数。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤呼吸时间变异性

不同营林措施下土壤呼吸速率呈现显著的季节变化 ( $P < 0.001$ ), 土壤呼吸速率均在7月达到最大值, CK, SM, H1, H2 样地土壤呼吸速率最大值分别为  $3.293, 2.367, 3.466, 4.304 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。除 SM, H1, H2 土壤呼吸速率显著高于对照 ( $P <$

$0.001$ ), 且在3月份达到最小值(图1)。从月动态来看, 在采伐后2个月,  $H1 > CK > SM > H2$ , 次年3月和4月各个处理土壤呼吸速率无明显差异, 直至次年5月开始出现较大的差异。对照、除灌、采伐 I、采伐 II 样地土壤呼吸速率变化范围分别为  $0.32 \sim 5.78, 0.34 \sim 4.32, 0.36 \sim 5.89, 0.40 \sim 8.16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

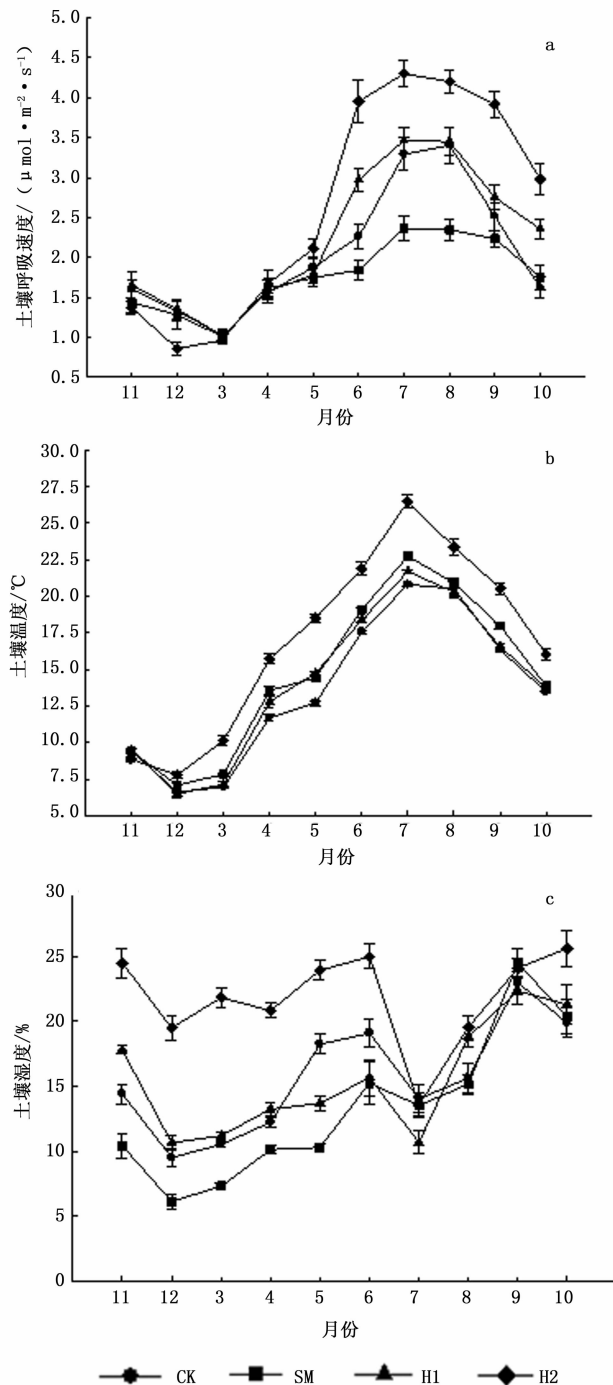


图1 不同营林措施下土壤呼吸速率(a)、土壤温度(b)、土壤湿度(c)季节动态

表2 不同营林措施土壤温度( $T$ )、土壤湿度( $W$ )和土壤呼吸速率( $R_s$ )平均值多重比较

营林措施	土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$		土壤湿度/%		土壤呼吸速率/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	
	均值	标准误	均值	标准误	均值	标准误
对照(CK)	14.45 a	0.33	16.07 b	0.39	2.18 b	0.07
除灌(SM)	15.63 a	0.34	13.70 a	0.47	1.82 a	0.05
采伐 I(H1)	15.02 a	0.33	15.49 b	0.39	2.37 b	0.07
采伐 II(H2)	18.14 b	0.41	21.63 c	0.37	2.86 c	0.1

表中 a、b、c 表示显著性差异组别( $\alpha=0.005$ )

### 3.2 土壤温度与土壤呼吸

除采伐 II 外,其余营林措施土壤温度差异并不显著(表2)。所有营林措施下,土壤呼吸速率与土壤温度呈现极显著的相关关系( $P<0.001$ ),土壤温度的升高造成了土壤中  $\text{CO}_2$  排放的增加(图1)。相较于除灌( $R^2=0.346, P<0.001$ ),对照( $R^2=$

$0.514, P<0.001$ )、采伐 I( $R^2=0.589, P<0.001$ )、采伐 II( $R^2=0.682, P<0.001$ )土壤呼吸速率均与土壤温度呈现较好的指数关系(表3)。对照、除灌、采伐 I、采伐 II 处理方式下,  $Q_{10}$  值分别为  $2.18 \pm 1.09$ ,  $1.65 \pm 0.07$ ,  $2.20 \pm 0.09$ ,  $2.36 \pm 0.09$ 。

表3 不同营林措施土壤温度( $T$ )、土壤湿度( $W$ )与土壤呼吸速率( $R_s$ )的模型参数

营林措施	土壤温度				土壤湿度			
	参数	数值	标准误	$R^2$	参数	数值	标准误	$R^2$
对照(CK)	$a$	0.61	0.046	0.514	$b_1$	3.126	0.51	0.023
	$b$	0.078	0.05		$b_2$	-0.136	0.064	
					$b_3$	0.004	0.002	
除灌(SM)	$a$	0.763	0.056	0.346	$b_1$	0.709	0.229	0.183
	$b$	0.05	0.004		$b_2$	0.122	0.031	
					$b_3$	-0.002	0.001	
采伐 I(H1)	$a$	0.639	0.043	0.589	$b_1$	2.275	0.462	0.095
	$b$	0.079	0.004		$b_2$	-0.046	0.058	
					$b_3$	0.003	0.002	
采伐 II(H2)	$a$	0.499	0.036	0.682	$b_1$	6.499	0.984	0.058
	$b$	0.086	0.004		$b_2$	-0.332	0.097	
					$b_3$	0.007	0.002	

对照土壤湿度土壤呼吸速率关系模型  $P=0.067$ , 其余模型  $P \leq 0.001$ 。

### 3.3 土壤湿度与土壤呼吸

由相关性分析可知,除对照外( $R=0.037, P=0.566$ )外,除灌( $R=0.400, P<0.001$ )、采伐 I( $R=0.288, P<0.001$ )、采伐 II( $R=-0.143, P=0.026$ )样地与土壤湿度呈现不同程度的相关关系。虽然观测期内,不同处理方式下土壤湿度均值与土壤呼吸速率均值呈现出一致的差异性,即采伐 II > 采伐 I > 对照 > 除灌(表2),但由土壤呼吸与土壤湿度拟合方程可知,土壤湿度仅能解释土壤呼吸速率变异性的 2.3%~18.3%(表3),土壤湿度单一因素并不能有效的说明土壤呼吸的变异性。

### 3.4 土壤温度与土壤湿度对土壤呼吸的叠加效应

相较于除灌( $R^2=0.379, P<0.001$ ),土壤温度与土壤湿度的共同作用能更好的解释对照( $R^2=0.520, P<0.001$ )、采伐 I( $R^2=0.620, P<0.001$ )、采伐 II( $R^2=0.694, P<0.001$ )的土壤呼吸速率变化(表4)。土壤呼吸与土壤温度以及土壤湿度的复合

表4 土壤呼吸( $R_s$ )与土壤温度( $T$ )及土壤湿度( $W$ )复合关系模型参数

营林措施	参数	数值	标准误	$R^2$
对照(CK)	$c_1$	-0.592	0.245	0.520
	$c_2$	0.091	0.015	
	$c_3$	0.008	0.020	
	$c_4$	-0.001	0.001	
除灌(SM)	$c_1$	-0.264	0.171	0.379
	$c_2$	0.038	0.011	
	$c_3$	0.060	0.017	
	$c_4$	0.000	0.001	
采伐 I(H1)	$c_1$	-1.004	0.211	0.620
	$c_2$	0.098	0.012	
	$c_3$	0.045	0.016	
	$c_4$	-0.002	0.001	
采伐 II(H2)	$c_1$	-0.880	0.316	0.694
	$c_2$	0.082	0.014	
	$c_3$	0.006	0.014	
	$c_4$	0.000	0.001	

$P<0.001$ 。

模型决定系数  $R^2$  相较于土壤温度因子或土壤湿度

因子单一模型的决定系数均有一定的提高,表明土壤温湿度的叠加能更准确的阐明土壤呼吸的动态变化,营林后土壤温湿度的协同变化造成了土壤呼吸速率的差异性。

### 3.5 不同处理下土壤呼吸变化幅度

由图2可知,不同营林措施使得土壤呼吸速率变化幅度表现出了明显的差异。除灌措施下土壤呼吸呈现减少、增加、减少的趋势,土壤呼吸速率变化幅度于次年8月达到最大值31.12%;采伐I变化较一致,除了次年3月、5月出现较小幅度的减少外,均呈现增加的变化;而采伐处理2样地则是以次年3月为界限,在3月之前土壤呼吸速率低于对照,最低值达到35.4%,3月之后开始高于对照。采伐I(H1)与采伐II(H2)处理均在次年10月生长季结束时达到最大变幅,分别为45.53%与84.26%。整体来看,以次年生长季开始(14年3月与4月)为界限,各处理下土壤呼吸速率变化幅度最小。在此界限之前与之后,各个处理土壤呼吸变化幅度均较大。在采伐与除灌后第1个生长季结束时,土壤呼吸速率较对照变化幅度分别为:除灌减少10.02%,采伐I增加9.30%,采伐II增加23.19%。

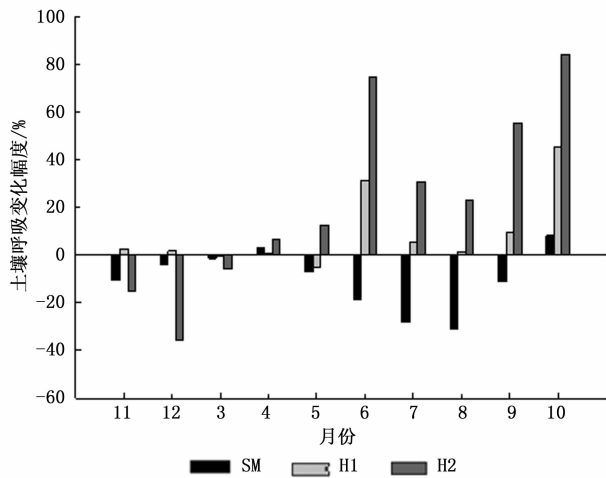


图2 不同营林措施下土壤呼吸变化幅度

## 4 讨论

### 4.1 不同处理对土壤呼吸的影响

森林采伐一般会导致地上部分碳储量发生巨大的变化,同时造成森林生态系统中生物因子(根系、土壤动物和微生物等)和气候因子(温度、湿度等)的变化,从而影响森林土壤的CO<sub>2</sub>排放<sup>[16-17]</sup>。通常认为,采伐干扰短期内会增加土壤呼吸<sup>[18-19]</sup>。本研

究中,不同采伐处理后1年内土壤呼吸速率均值采伐II>采伐I>对照>除灌(表2),与对照相比,除灌减少5.86%,采伐I增加9.16%,采伐II增加17.28%。除灌呼吸速率低于对照这主要由于在灌丛收割后,对样地收割残料进行了仔细的清理,减少了地表C的输入,这与对落叶松人工林灌丛与凋落物清理的研究结论一致<sup>[20]</sup>。而采伐I和采伐II处理下的样地并未进行残料清理,采伐时造成的采伐剩余物为土壤呼吸提供了充足的底物,造成了土壤呼吸速率的增加,这与国内外许多研究者结果相似。例如,不同强度择伐后小兴安岭针叶林土壤有机质含量与地表CO<sub>2</sub>通量均增加<sup>[21]</sup>;择伐造成了针阔混交林和阔叶林的地表C通量43%与14%增值<sup>[19]</sup>。在上述结果中,微生物的变化起着至关重要的作用,森林经营措施对土壤微生物群落结构和功能产生显著的影响,进而作用于土壤呼吸速率<sup>[22]</sup>,关于采伐后微生物方面的变化对于土壤呼吸速率的影响会在另外的论文中进行详细的阐述。

然而,也有研究认为森林采伐造成的根呼吸的降低远远大于采伐造成的异养呼吸的增加,因此会造成总的土壤呼吸速率的降低<sup>[16]</sup>。这也许是采伐II在采伐后初期土壤呼吸速率低于对照样地的原因之一。采伐II样地较采伐I强度更高,受到干扰强度大,根呼吸大量减少,而在采伐后2个月,采伐处理2样地土壤湿度高,温度低,降低了微生物活性,进而使得异养呼吸值低。此外,结果的多样性一方面取决于采伐的强度、类型以及保留树木的生长(光合作用)对于地上生物量减少的补偿速度。另一方面,年际之间气候的变化对森林采伐后生理方面的影响也非常重要,如温度、光合有效辐射(PAR)以及降雨等能够促进植物固C减少呼吸的因素的变化<sup>[23-25]</sup>。同时,采伐干扰后,距离采伐干扰发生时的调查时间也至关重要。对福建杉木人工林和常绿次生阔叶林的皆伐研究表明,皆伐后3~4月份土壤呼吸显著增加,随后2年内,土壤呼吸相对对照区域低<sup>[26]</sup>。

### 4.2 土壤温湿度对土壤呼吸作用的影响

土壤呼吸速率的季节变化与气候因子、植物生理活动、微生物群系以及死有机物质的输入量、性质相关<sup>[27]</sup>。多数研究表明,土壤呼吸速率在夏季土壤温度较高时达到最高值<sup>[12, 28]</sup>,本研究中,不同处理下土壤呼吸速率均在8月达到最高值,而冬季土壤温度较低时土壤呼吸速率达到最小值(图1)。较低

的土壤温度会促使微生物休眠,进而降低其活性减少土壤呼吸速率<sup>[29]</sup>。森林采伐与除灌措施并未改变土壤温度对于土壤呼吸的作用(表 2),但相较于采伐处理,土壤温度仅能解释除灌样地土壤呼吸变异的 34.6%,低于对照 51.4%,同时其  $Q_{10}$  值  $1.65 \pm 0.07$  也显著低于对照  $2.18 \pm 1.09$ ,这说明相较于采伐处理,除灌处理后土壤呼吸速率对土壤温度变化响应的敏感性降低,这与已有同类研究的结论相似<sup>[21]</sup>。同时,采伐处理措施  $Q_{10}$  值高于对照,这可能由于森林采伐造成了根呼吸的增加,而根呼吸是土壤呼吸的主要组成部分且具有较高的温度敏感性<sup>[28]</sup>。

采伐和除灌措施造成了土壤湿度的差异性,直至采伐后 8 个月土壤温湿度差异减小(图 1)。采伐与除灌处理中,除灌处理下土壤湿度最低,主要源于失去灌丛的遮挡,无法阻挡降水对于地表的冲击,土壤水分涵养功能减弱,土壤水分蒸发快<sup>[21]</sup>。而采伐处理下,乔木的减少,林内环境的改变有利于下层灌木与草本生长,使得土壤湿度较高。通过土壤湿度与土壤呼吸速率拟合方程可知土壤湿度并不能很好的阐明土壤呼吸的变化(表 2)。这与相关研究结果一致。如太原天龙山自然保护区油松林 4 年土壤呼吸观测研究表明,土壤湿度仅能解释土壤呼吸的 2%~25%<sup>[30]</sup>,与本研究区域较接近的神农架不同海拔梯度上 4 种森林类型的土壤呼吸研究表明土壤呼吸与土壤湿度并无显著地相关关系<sup>[31]</sup>。

土壤湿度与土壤温度共同作用相较于单一因子能更准确的解释土壤呼吸的变化(表 4)。在样地处理后初期(处理后至次年 6 月),虽然土壤湿度差异较大,但土壤温度是主要限制因素,除采伐 II 外,土壤呼吸值在土壤水热综合作用下并未表现出明显的差异。而采伐 II 土壤呼吸速率较低主要源于较高的土壤湿度的限制(图 1)。土壤湿度直接影响着微生物活性,如土壤中水的运动、气体体积以及溶质的淋溶扩散等,土壤湿度过高或过低均会影响土壤微生物呼吸、根系生长等,进而对土壤呼吸产生影响<sup>[3, 32]</sup>。自生长旺盛期(次年 7 月)开始,土壤温度较高,而土壤湿度降低,为土壤微生物活动、凋落物分解等提供了适宜的环境,使得土壤呼吸较高。

## 5 结 论

除灌显著降低了马尾松飞播林土壤呼吸速率,至第 1 个生长季结束,土壤呼吸速率较对照降低幅

度为 10.02%,并降低了其温度敏感性。采伐造成了土壤呼吸速率的增加,且强度与土壤呼吸增值呈正比,采伐 I 造成了土壤呼吸 9.30% 的变化幅度,采伐 II 造成了土壤呼吸速率 23.19% 的变化幅度。采伐对于土壤呼吸温度敏感性影响并不一致,强度大的采伐 II 的  $Q_{10}$  值显著低于采伐 I 与对照。由此可见,不同的营林措施对于土壤呼吸的影响有着复杂的影响,仅从土壤温湿度环境因子出发并不能全面的阐述其对于森林土壤呼吸的影响,仍需加大其他相关因素的调查,如微生物活性、土壤养分变化、植物组成等,同时对土壤呼吸进行长期连续的观测等,才能科学认识营林措施对土壤呼吸变化的影响和作用机理。

森林经营方式的干扰强度对土壤呼吸有着重要影响,本文中不同营林措施下土壤温湿度与土壤呼吸的拟合方程可用于定量估算土壤碳排放,但对于整个森林系统碳固定效益有待进一步分析。

## 参 考 文 献:

- [1] Gough C M, Vogel C S, Harrold K H, *et al.* The legacy of harvest and fire on ecosystem carbon storage in a north temperate forest [J]. *Global Change Biology*, 2007(13): 1935 - 1949.
- [2] Dixon R K, Brown S, Houghton R A. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263: 185.
- [3] Olajuyigbe S, Tobin B, Saunders M, *et al.* Forest thinning and soil respiration in a Sitka spruce forest in Ireland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157: 86 - 95.
- [4] Subke J, Voke N R, Leronni V, *et al.* Dynamics and pathways of autotrophic and heterotrophic soil CO<sub>2</sub> efflux revealed by forest girdling [J]. *Journal of Ecology*, 2011, 99(1): 186 - 193.
- [5] 朱 凡, 王光军, 田大伦, 等. 马尾松人工林根呼吸的季节变化及影响因子 [J]. *林业科学*, 2010, 46(7): 36 - 41.
- [6] Litton C M, Raich J W, Ryan M G. Carbon allocation in forest ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(10): 2089 - 2109.
- [7] Amiro B D, Barr A G, Barr J G, *et al.* Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115.
- [8] 黄志霖, 肖文发. 生物群区和林龄对森林土壤呼吸及其组分的影响 [J]. *生态学报*, 2008, 28(9): 4078 - 4087.
- [9] Dale W. Johnson, Peter S. Curtis. Effects of forest management on temperate forest soil C and N storage: meta-analysis [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 140(2 - 3): 227 - 238.
- [10] Fleming R L, Laporte M F, Hogan G D, *et al.* Effects of harvesting and soil disturbance on soil CO<sub>2</sub> [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36(3): 589 - 600.
- [11] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 584 - 590.

- [12] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 马尾松林土壤呼吸对去除和添加凋落物处理的响应[J]. 林业科学, 2009, 45(1): 27-30.
- [13] 肖文发, 雷静品. 三峡库区森林植被恢复与可持续经营研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(2): 138-144.
- [14] 韩海燕, 曾立雄, 雷静品, 等. 三峡库区兰陵溪小流域3种林型土壤呼吸组分的量化[J]. 东北林业大学学报, 2014(03): 73-76.
- [15] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 445-451.
- [16] Tang J, Qi Y, Xu M, *et al.* Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada[J]. *Tree Physiology*. 2005, 25(1): 57-66.
- [17] 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.
- [18] Concilio A, Ma S, Li Q, *et al.* Soil respiration response to prescribed burning and thinning in mixed-conifer and hardwood forests[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(7): 1581-1591.
- [19] Laurent M, Tang J W, Xu M, *et al.* Influences of recovery from clear-cut, climate variability, and thinning on the carbon balance of a young ponderosa pine plantation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130(3-4): 207-222.
- [20] 王文杰, 刘 玮, 孙 伟, 等. 林床清理对落叶松(*Larix gmelinii*)人工林土壤呼吸和物理性质的影响[J]. 生态学报, 2008(10): 4750-4756.
- [21] 孟 春, 王立海, 沈 微. 小兴安岭针阔混交林择伐6 a后林地土壤呼吸速率空间变异性[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(3): 72-75.
- [22] Moore-Kucera J, Dick R P. PLFA Profiling of Microbial Community Structure and Seasonal Shifts in Soils of a Douglas-fir Chronosequence[J]. *Microbial Ecology*, 2008, 55(3): 500-511.
- [23] Peter H, Anders N, Nina B, *et al.* Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration[J]. *Nature*, 2001, 411: 789-792.
- [24] Saunders M, Tobin B, Black K, *et al.* Thinning effects on the net ecosystem carbon exchange of a Sitka spruce forest are temperature-dependent[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157: 1-10.
- [25] Sullivan B W, Kolb T E, Hart S C, *et al.* Thinning reduces soil carbon dioxide but not methane flux from southwestern USA ponderosa pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(12): 4047-4055.
- [26] Guo J, Yang Y, Chen G, *et al.* Effects of clear-cutting and slash burning on soil respiration in Chinese fir and evergreen broadleaved forests in mid-subtropical China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1-2): 249-261.
- [27] Jérôme N, Daniel E, Nicolas D, *et al.* Spatial variability of soil CO<sub>2</sub> efflux linked to soil parameters and ecosystem characteristics in a temperate beech forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154-155: 136-146.
- [28] Saiz G, Green C, Butterbach-Bahl K, *et al.* Seasonal and spatial variability of soil respiration in four Sitka spruce stands [J]. *Plant and Soil*, 2006, 287(1-2): 161-176.
- [29] Epron D, Ngao J R, Granier A. Interannual variation of soil respiration in a beech forest ecosystem over a six-year study[J]. *Annals of Forest Science*, 2004, 61(6): 499-505.
- [30] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2009(12): 6366-6376.
- [31] 罗 璐, 申国珍, 谢宗强, 等. 神农架海拔梯度上4种典型森林的土壤呼吸组分及其对温度的敏感性[J]. 植物生态学报, 2011(07): 722-730.
- [32] 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 等. 改变C源输入对油松人工林土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2768-2777.