

DOI: 10.5846/201503020398

雷蕾,肖文发,曾立雄,黄志霖,谭本旺.马尾松林土壤呼吸组分对不同营林措施的影响.生态学报,2016,36(17): - .

Lei L, Xiao W F, Zeng L X, Huang Z L, Tan B W. Responses of soil respiration and its components to forest management in *Pinus massoniana* stands. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): - .

马尾松林土壤呼吸组分对不同营林措施的响应

雷 蕾^{1,2}, 肖文发^{1,2}, 曾立雄^{1,2,*}, 黄志霖^{1,2}, 谭本旺³

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 南京林业大学南方现代林业协同创新中心,南京 210037

3 湖北省秭归县林业局,宜昌 443631

摘要:针对不同营林措施(对照、除灌、采伐 1(15%)、采伐 2(70%))后的三峡库区马尾松飞播林,采用 LI-8100 对其土壤呼吸组分的呼吸速率和土壤温度、湿度进行为期 1 年的连续观测分析表明,不同营林措施对土壤呼吸组分的影响不同。1) 观测期内,各营林措施下调落物层呼吸速率差异并不显著,对照、除灌、采伐 1、采伐 2 的根呼吸速率均值分别为:1.00、0.83、0.86、1.11 $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$;采伐处理下矿质土壤呼吸显著高于对照和除灌($P<0.05$); 2) 与对照相比,营林措施并未显著改变凋落物呼吸对于土壤总呼吸的贡献率(18.78%—23.70%),但降低了根呼吸的贡献率,其中以采伐 1 最为显著($P<0.05$);除灌的矿质土壤呼吸贡献率(37%)与对照(38.32%)相近,而采伐 1(45.63%)和采伐 2(43.07%)均显著增加了矿质土壤呼吸的贡献率,矿质土壤呼吸的变化是造成采伐措施下土壤呼吸变化的主要土壤呼吸组分;3) 营林后仅采伐 2 措施下土壤温湿度显著高于对照,土壤温湿度双因子模型较单因子模型能更好的解释土壤呼吸组分变化,但仅能解释其部分变化(4.6%—59.3%),仍需对营林后其他相关因子进行深入的综合研究。

关键词:营林措施;土壤呼吸组分;凋落物层呼吸;根系呼吸;矿质土壤呼吸

Responses of soil respiration and its components to forest management in *Pinus massoniana* stands

LEI Lei^{1,2}, XIAO Wenfa^{1,2}, ZENG Lixiong^{1,2,*}, HUANG Zhilin^{1,2}, TAN Benwang³

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 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 National Forest Ecosystem Station of Three Gorges Reservoir in Zigui County, Yichang 443631, China

Abstract: Forest soils play a critical role in the carbon cycle and carbon sequestration at both global and local scales, and forest management practices (e.g., harvesting, burning, and thinning) influence soil carbon processes by altering organic matter quality and quantity, key microclimatic conditions, microbial communities, and other factors. However, the effects of forest management on soil carbon effluxes in different ecosystems are still largely unknown, despite being critical to estimate global carbon fluxes. Quantifying the responses of soil respiration and its components to forest management is vital to accurately evaluate forest carbon balance. Thus, an aerially seeded *Pinus massoniana* forest was chosen in the Three Gorges reservoir area to evaluate the effects on soil respiration of different forest management practices (i.e., control; shrub-cutting; harvesting all shrubs and removing all harvest residues. Harvest strategy 1—15% harvest intensity and removing main harvest residues without leaves and small branches; Harvest strategy 2—70% harvest intensity and the same harvest

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFRIFEEP201101);林业公益性行业科研专项(201104008)

收稿日期:2015-03-02; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zlxcaf@163.com

residue management as that in harvest 1). All experimental treatments were located in similar habitats and consisted of three 20 m × 20 m plots. The treatments were conducted in October 2013. A combination of trenching and litter removing methods were employed in order to partition soil respiration into components of litter layer respiration, root respiration, and mineral soil respiration. The soil temperature, soil moisture, and rate of soil respiration and its components were observed continuously for one year (from November 2013 to October 2014) using a Li-8100 system. Management did not affect litter layer respiration within the measuring period. Root respiration in the control, shrub-cutting, harvest strategy 1, and harvest strategy 2 treatments were 1.00, 0.83, 0.86, and 1.11 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively. The mineral soil respiration of harvested stands was significantly higher than that of control and shrub-cutting stands ($P < 0.05$). The proportion of litter layer respiration to total respiration was not significantly influenced by forest management (18.78%—23.70%), but the contribution of root respiration to total respiration was reduced, especially in the harvest strategy 1 treatment ($P < 0.05$). The contribution of mineral respiration to total respiration significantly increased in harvested stands, which was mainly attributed to the decrease in total soil respiration. Management effects on soil temperature and soil moisture were only observed in the stands of harvest strategy 2. A two-factor model that included soil temperature and moisture better explained the variations in soil respiration (4.6%—59.3%) than that by a model using temperature (4.2%—59.1%) or moisture (0.3%—23.5%) alone. Other factors that influence soil respiration and its components need to be further elucidated.

Key Words: forest management; soil respiration components; litter layer respiration; root respiration; mineral soil respiration

土壤碳库的微小的变化都会对全球碳循环和气候产生重要的影响^[1-3]。土壤呼吸作为森林土壤碳库主要输出过程之一,占森林生态系统碳排放的 30%—80%^[4],是森林参与全球碳循环的关键部分。多样的森林类型和不同营林措施的干扰造成了森林土壤碳库维持机制、碳固定过程的研究较大的不确定性^[5]。森林管理措施如采伐、火烧、林床清理等,可能通过改变地上植被组成、土壤环境因子、有机物质分解速率等进而干扰着土壤呼吸过程^[6-7]。近些年来许多学者针对采伐措施对土壤总呼吸速率影响进行了大量研究^[7-9],土壤呼吸速率呈现增加^[10-11]、减少^[12]或不变^[7, 13]的结果,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,以定量预测营林措施对于碳循环的影响进而制定出合理的森林经营方案。土壤呼吸主要由根呼吸、矿质土壤呼吸以及凋落物层呼吸三部分组成,森林土壤呼吸组分与环境要素关系密切^[14-15],估算营林措施后森林土壤呼吸组分的变化是评估营林干扰对森林土壤碳库过程的首要内容^[9]。

马尾松(*Pinus massoniana*)是中国南方主要造林树种,是三峡库区分布面积最大的森林类型^[16]。目前关于本区域马尾松林人为管理后土壤呼吸变化尚未见报道。本研究以三峡库区人为管理后马尾松飞播林为研究对象,对不同营林措施(对照(未采伐)、除灌(清除灌丛)、采伐 1(强度 15%)、采伐 2(强度 70%)后土壤呼吸组分以及 5cm 深处土壤温湿度进行连续观测,以探讨不同营林措施后马尾松林土壤呼吸组分的变化情况以及土壤温湿度对其变化的影响作用,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固碳效应。

1 研究区概况

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—2030.6m,年均气温 16.9℃,年降水量 1000—1250mm,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^[17]。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,盖度为 80%,伴生有少量光皮桦(*Betula luminifera*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)。灌木主要有火棘(*Pyracantha fortuneana*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、木姜子(*Litsea pungens*)等,草本主要有狗脊(*Woodwardia japonica*)、苔草(*Carex tristachya*)、三脉紫菀(*Aster ageratoides*)、中日金星蕨

(*Parathelypteris nipponica*) 等。

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,除灌(、采伐 1、采伐 2,分别设立 3 块 20m×20m 固定样地,除灌(SM)措施清除样地内所有灌木,并对灌木清理中产生的剩余物(灌丛枝叶等)进行仔细清除;采伐 1(H1)措施清除样地内径阶在 4cm 以上的非马尾松(主要为光皮桦、漆树、杉木,包括部分高大灌木,如木姜子、火棘等),强度为 15%(按胸高断面面积计算);采伐 2(H2)措施清除样地内平均胸径(17.9cm)以上的马尾松,强度为 70%。同时在固定样地相邻处,土壤条件基本相同的林地,设置对照固定样地 3 块(20m×20m)。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。各种经营措施并未对活地被层草本以及地表枯落物进行任何处理,上述营林措施于 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

Table 1 General situation of aerially seeded *Pinus massoniana* under different forest management

营林措施 Forest management	对照(CK) Control	除灌(SM) Shrubs-cutting	采伐 1(H1) Harvest 1	采伐 2(H2) Harvest 2	
坡度 Grade	34°	35°	33°	33°	
坡向 Exposure	西北	西北	西北	西北	
海拔 Altitude/m	1225	1240	1200	1226	
胸径 DBH/cm	11.1(0.37)	12.5(0.43)	17.74(0.56)	9.36(0.30)	
林分密度 Stand density/(tree/hm ²)	1688(6.25)	1480(13.45)	524(17.38)	908(8.74)	
树高 Tree height /m	8.33(0.14)	8.91(0.16)	12.35(0.24)	8.54(0.58)	
草本高度 Height of grass/cm	28.16(3.02)	25.90(2.72)	31.76(3.67)	31.75(5.09)	
月凋落物量(烘干重) Monthly litter fall(dry weight)/(g/m ²)	47.09(3.16)	34.75(3.40)	39.03(4.14)	7.57(1.25)	
0—10cm 土壤理化指标	有机碳 Organic carbon	22.7(0.73)	22.09(0.35)	22.35(0.32)	21.71(0.21)
Soil physical and chemical characteristics in 0—10cm soil layer/(g/kg)	氮含量 Total nitrogen	1.05(0.01)	1.06(0.12)	0.95(0.01)	1.05(0.01)
	磷含量 Total phosphorus	0.20(0.01)	0.24(0.01)	0.23(0.01)	0.24(0.01)
	钾含量 Total kalium	0.25(0.01)	0.10(0.03)	0.11(0.01)	0.13(0.02)

括号内数值为标准误

2 研究方法

2.1 土壤呼吸及土壤温湿度测定

在设定的固定样地内选择条件基本一致的地点随机设置 3 种观测小区(1m×1m):对照小区(保留凋落物层+保留根系);去凋小区(去除凋落物层+保留根系);断根小区(保留凋落物层+切断根系,在小区四周垂直挖深至 1m 左右,直至看不到根系,切断根系,并在四周埋入厚塑料板以阻止外围根系向样方内生长)。每种小区重复 3 次。每个小区内各布设 1 个直径 20 cm、深度 8 cm 的聚氯乙烯(polyvinylchloride, PVC, 5cm 埋入地下^[18])土壤环置放于土壤表层内。观测小区内部均无灌木和乔木,草本、枯落物等分布均匀。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 5cm 土壤的温度以及体积含水量(本文中土壤湿度均为体积含水量),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)每月于中旬和月底各测定一次,共测定 2 次,非生长季每月于月底测定 1 次;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。

2.2 数据统计分析

月土壤呼吸组分的呼吸速率是每月测量值的平均值,土壤呼吸组分的呼吸速率均值是观测期内(2013 年 11 月—2014 年 10 月)测量的平均值。

土壤呼吸组分计算公式为^[19]:

$$RL = R_1 - R_2 ; RR = R_1 - R_3 ; RM = R_3 - RL \quad (1)$$

式中, RL 为凋落物层呼吸速率 ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$); RR 为根系呼吸速率 ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$); RM 为矿质土壤呼吸速率 ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$); R_1 为对照小区土壤呼吸速率 ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 即总呼吸 R_{tot} ; R_2 为去凋小区土壤呼吸速率 ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$); R_3 为断根小区土壤呼吸速率 ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)。断根小区于首次测定前 3 个月设置, 相关研究认为挖根后 3 个月可忽略死根分解的干扰^[15]。

各土壤呼吸组分对土壤呼吸速率贡献率 (%) 通过式 (1) 中计算的各项值除以 R_1 乘以 100 计算获得。凋落物层、根系的土壤温度 T_1 (°C) 和湿度 W_1 (%) 均为对照小区土壤的温度和湿度; 矿质土壤温度 T_2 (°C) 和湿度 W_2 (%) 均为断根小区土壤的温度和湿度。

经验指数方程用于描述土壤呼吸与土壤表层温度的关系 (方程 (2)),

$$Rs = ae^{bT} \quad (2)$$

式中, Rs 为测定的土壤呼吸速率 ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$), T 为表层 5cm 土壤温度 (°C), a 是温度为 0°C 的土壤呼吸, b 为温度反应系数。

土壤呼吸速率与土壤湿度 (W) 之间的关系通过二次回归方程 (3) 计算:

$$Rs = b_1 + b_2 \times W + b_3 \times W^2 \quad (3)$$

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 (2) 中, 如下式所示:

$$\text{Ln}Rs = c_1 + c_2 \times T + c_3 \times W + c_4 \times T \times W \quad (4)$$

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

所有的统计分析都在 SPSS19 软件中进行, 用 Repeated measured ANOVA 检验土壤呼吸组分季节变化的显著性, 用 SigmaPlot 11.0 软件作图。

3 结果与分析

3.1 呼吸组分时间变异性

从观测期内土壤呼吸速率月均值来看, 与对照样地相比, 除灌措施显著降低了森林土壤总呼吸 R_{tot} , 降低了 17.74%, 采伐 2 措施则对森林土壤总呼吸 R_{tot} 具有显著的促进作用, 提高了 17.34%, 采伐 1 措施对森林土壤总呼吸 R_{tot} 没有产生明显的影响。从不同土壤呼吸组分来看, 除灌措施显著降低了矿质土壤呼吸 RM , 采伐 1 和采伐 2 措施均显著提高了矿质土壤呼吸 RM ; 除灌和采伐 1 措施都显著降低了森林土壤的根呼吸 RR , 采伐 2 措施对森林土壤的根呼吸 RR 无显著影响; 而所有营林措施对凋落物呼吸 RL 影响均不显著, 均值在 0.47—0.53 之间 (表 2)。

表 2 不同营林措施土壤呼吸组分平均值多重比较 (单位: $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

Table 2 One way ANOVA for the means of soil respiration components under different forest management (unit: $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

营林措施 Forest management	凋落物层呼吸速率 RL Litter layer Respiration		根系呼吸速率 RR Root respiration		矿质土壤呼吸速率 RM Mineral soil respiration		土壤总呼吸速率 R _{tot} Total respiration	
	均值 Mean	标准误 SE	均值 Mean	标准误 SE	均值 Mean	标准误 SE	均值 Mean	标准误 SE
对照 (CK) control	0.53a	0.04	1.00a	0.05	0.95b	0.06	2.48b	0.10
除灌 (SM) Shrubs-cutting	0.46a	0.02	0.83b	0.04	0.75c	0.05	2.04c	0.07
采伐 1 (H1) Harvest 1	0.47a	0.03	0.86b	0.04	1.17a	0.07	2.50b	0.10
采伐 2 (H2) Harvest 2	0.53a	0.04	1.11a	0.06	1.27a	0.07	2.91a	0.12

同列 a、b、c 表示显著性差异组别 ($\alpha=0.005$)

由图 1 不同呼吸组分土壤呼吸速率月变化可知, 不同营林措施下土壤总呼吸 R_{tot} 、 RR 、 RM 月均值在夏季

生长旺盛期7—8月期间达到最高,而RL中除灌措施(SM)下土壤呼吸速率均值在6月达到最高,其余营林措施下RL也均在7—8月间达到最高(图1)。相较于其他呼吸组分,凋落物呼吸RL月际变化较小,对照(CK)、除灌(SM)、采伐1(H1)、采伐2(H2)月均最低值范围为 $0.20\text{--}0.31\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$,最高值范围为 $0.94\text{--}1.08\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。根呼吸RR和矿质土壤呼吸RM月际变化较大,其中H2的RR与RM在观测期内变化波动最大,RR、RM月均值差值分别为 1.65 、 $1.75\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$,CK次之,其RR、RM月均值差值分别为 1.17 、 $1.16\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

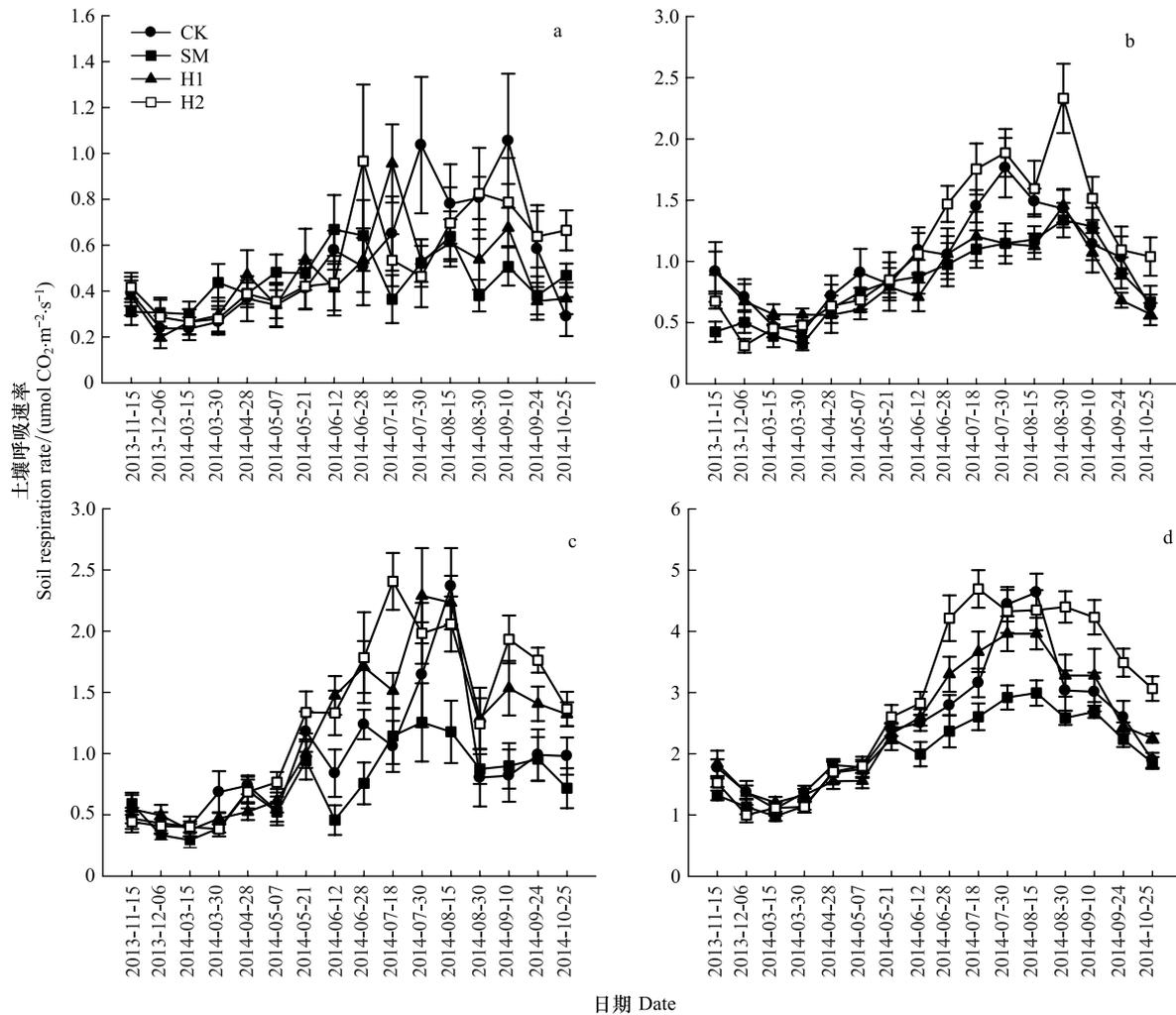


图1 不同营林措施下土壤呼吸月变化

Fig.1 Monthly dynamics of soil respiration under different forest management

a) RL; b) RR; c) RM; d) Rtot; 误差项为标准误 Error bars show SE

3.2 不同营林措施下土壤呼吸组分对土壤呼吸贡献率

不同营林措施下根呼吸RR和矿质土壤呼吸RM是土壤总呼吸的主要组成部分,两者对于总呼吸的贡献率均分别在 $35.75\%\text{--}40.44\%$ 和 $37.00\%\text{--}45.63\%$ 之间,而凋落物呼吸贡献率则在 $18.62\%\text{--}23.70\%$ 之间。

不同营林措施下SM的RL贡献率最大(23.70%),RM贡献率最小(37.00%);H1的RL和RR贡献率在这几种处理中均最小分别为 18.78% 、 35.81% ,而其RM贡献率最大为 45.42% ;对照CK的RR贡献率最大, 40.44% 。不同营林措施下土壤呼吸组分的贡献率差异性也呈现出不同的结果,采伐措施(H1和H2)RL的贡献率显著低于除灌措施(SM)($P<0.01$),而与对照(CK)差异并不显著;对对照地的RR贡献率显著高于采伐1($P<0.01$)而与其它措施较相近;矿质土壤呼吸RM贡献率随着干扰的强度而显著分化为两组,对照和除灌

显著低于采伐措施 ($P < 0.01$) (表 3)。

表 3 不同营林措施下土壤呼吸组分对土壤呼吸贡献率 (单位: %)

Table 3 Contribution rate of soil respiration components for soil respiration (unit: %)

营林措施 Forest management	凋落物层呼吸速率 RL Litter layer Respiration		根系呼吸速率 RR Root respiration		矿质土壤呼吸速率 RM Mineral soil respiration	
	均值 Mean	标准误 SE	均值 Mean	标准误 SE	均值 Mean	标准误 SE
对照 (CK) Control	21.24ab	1.19	40.44a	1.33	38.32b	1.74
除灌 (SM) Shrubs-cutting	23.70a	1.12	39.30ab	1.40	37.00b	1.62
采伐 1 (H1) Harvest 1	18.62b	0.97	35.75b	1.26	45.63a	1.56
采伐 2 (H2) Harvest 2	19.53b	1.02	37.40ab	1.01	43.07a	1.42

3.3 土壤温度与土壤呼吸组分

不同营林措施下土壤温度均在 7 月达到最高值 (图 2), 不同措施下仅 H2 的土壤温度月均值显著高于 CK (表 4)。土壤呼吸组分均与土壤温度呈现显著地正相关关系 ($P < 0.05$), 但通过本研究选取的土壤呼吸与温度关系方程拟合可知, 温度仅能很好的解释部分呼吸组分的变化, 如除灌和采伐 2 措施下土壤温度仅能解释土壤呼吸变化的 4.2% 和 4.5%, 对照和采伐 1 略高, 分别为 21.4% 和 16.5%。而根呼吸 RR 与土壤温度拟合程度高于 RL, R^2 从高到低依次为 H2 (0.498) > CK (0.352) > SM (0.339) > H1 (0.203)。不同营林措施下土壤温度与矿质土壤呼吸 RM 关系呈现显著地差异性, 采伐措施下土壤温度与 RM 拟合模型的 R^2 显著高于对照和除灌, 土壤温度能更好的解释采伐措施下 RM 的变化规律 (表 5)。

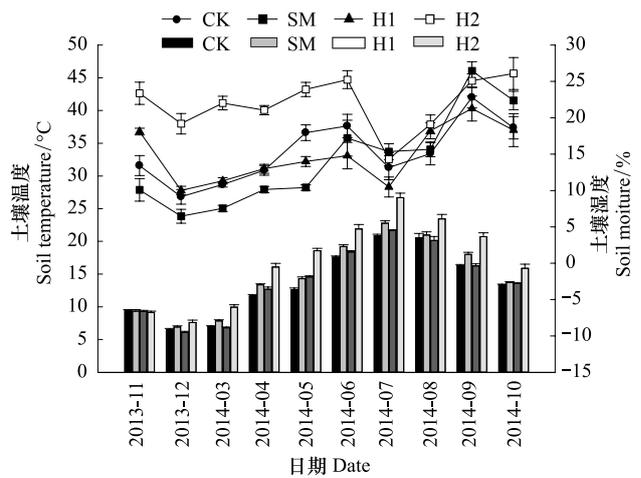


图 2 不同营林措施下土壤温度和土壤湿度变化

Fig.2 Soil temperature and soil moisture under different forest management

误差项为标准误 Error bars show SE

表 4 不同营林措施下土壤温度 ($T/^\circ\text{C}$) 与湿度 ($W/\%$) 平均值多重比较

Table 4 Multiple-range test for the means of soil temperature ($T/^\circ\text{C}$) and soil moisture ($W/\%$) under different forest management

营林措施 Forest management	土壤温度 T_1 Soil temperature		土壤湿度 W_1 Soil moisture		土壤温度 T_2 Soil temperature		土壤湿度 W_2 Soil moisture	
	均值 Mean	标准误 SE	均值 Mean	标准误 SE	均值 Mean	标准误 SE	均值 Mean	标准误 SE
	对照 (CK) Control	14.73b	0.45	15.71b	0.56	14.40b	0.46	20.26b
除灌 (SM) Shrubs-cutting	15.6b	0.48	14.65b	0.68	15.60b	0.48	18.13c	0.76
采伐 1 (H1) Harvest 1	14.83b	0.46	14.98b	0.53	14.90b	0.47	18.93ab	0.60
采伐 2 (H2) Harvest 2	18.21a	0.56	21.82a	0.49	18.83a	0.62	22.50a	0.49

3.4 土壤湿度与土壤呼吸组分

土壤湿度与土壤呼吸组分的关系较于土壤温度更加复杂, 土壤湿度对于土壤各呼吸组分并未表现出一致的相关性。除对照 RM ($R^2 = 0.001, P = 0.966$) 外, 土壤湿度能更好的解释其他处理措施下 RM 的变化, 其中以采伐 1 为最优 ($R^2 = 0.235, P < 0.01$)。而凋落物呼吸 RL 则相反, 除灌、采伐 1、采伐 2 下土壤湿度的变化并不能反映 RL 的变化, 而对照样地的 RL 与土壤湿度存在显著的相关关系, 但模型模拟效果并不理想 ($R^2 = 0.09, P < 0.01$)。不同营林措施下, 除灌和采伐 2 的土壤湿度分别能解释 RR 变化的 19.8% 和 14.8% ($P < 0.01$), 对照和采伐 1 的土壤湿度则并未与 RR 呈现出一定的相关性 (表 6)。总之, 土壤湿度仅能从较小的程度影响不同

呼吸组分的变化。

表 5 不同营林措施下土壤呼吸组分与土壤温度 (T) 关系模型参数

Table 5 Relation model parameters of soil respiration components and soil temperature (T)

营林措施 Forest management	参数 Parameter	凋落物层呼吸速率 RL Litter layer Respiration				根系呼吸速率 RR Root respiration				矿质土壤呼吸速率 RM Mineral soil respiration			
		数值 Value	标准误 SE	R^2	P	数值 Value	标准误 SE	R^2	P	数值 Value	标准误 SE	R^2	P
对照(CK)	a	0.109	0.024	0.214	<0.01	0.273	0.039	0.352	<0.01	0.245	0.049	0.197	<0.01
Control	b	0.085	0.014			0.077	0.009			0.073	0.013		
除灌(SM)	a	0.263	0.044	0.042	<0.05	0.182	0.031	0.339	<0.01	0.217	0.043	0.179	<0.01
Shrubs-cutting	b	0.024	0.010			0.083	0.010			0.063	0.012		
采伐1(H1)	a	0.120	0.027	0.165	<0.01	0.370	0.049	0.203	<0.01	0.207	0.029	0.510	<0.01
Harvest 1	b	0.070	0.014			0.047	0.008			0.100	0.009		
采伐2(H2)	a	0.232	0.052	0.045	<0.05	0.215	0.029	0.498	<0.01	0.194	0.025	0.591	<0.01
Harvest 2	b	0.028	0.012			0.078	0.007			0.086	0.006		

表 6 不同营林措施下土壤呼吸组分与土壤湿度 (W) 关系模型参数

Table 6 Relation model parameters of soil respiration components and soil moisture (W)

营林措施 Forest management	参数 Parameter	凋落物层呼吸速率 RL Litter layer Respiration				根系呼吸速率 RR Root respiration				矿质土壤呼吸速率 RM Mineral soil respiration			
		数值 Value	标准误 SE	R^2	P	数值 Value	标准误 SE	R^2	P	数值 Value	标准误 SE	R^2	P
对照(CK)	b_1	0.437	0.245	0.09	<0.01	0.936	0.296	0.015	0.381	0.97	0.429	0.001	0.966
Control	b_2	-0.012	0.031			-0.003	0.038			-0.005	0.046		
	b_3	0.001	0.001			0	0.001			0	0.001		
除灌(SM)	b_1	0.488	0.118	0.037	0.097	0.062	0.201	0.198	<0.01	0.029	0.277	0.162	<0.01
Shrubs-cutting	b_2	-0.011	0.016			0.082	0.027			0.062	0.034		
	b_3	0	0			-0.002	0.001			-0.001	0.001		
采伐1(H1)	b_1	0.43	0.199	0.003	0.844	0.682	0.256	0.017	0.338	0.161	0.47	0.235	<0.01
Harvest 1	b_2	0.002	0.025			0.013	0.032			0.052	0.053		
	b_3	0	0.001			0	0.001			0	0.001		
采伐2(H2)	b_1	0.467	0.469	0.016	0.372	4.095	0.729	0.148	<0.01	3.013	0.59	0.095	<0.01
Harvest 2	b_2	-0.005	0.045			-0.257	0.07			-0.134	0.06		
	b_3	0	0.001			0.005	0.002			0.002	0.001		

3.5 土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸组分协同作用

对比表 5、表 6、表 7 可知,土壤温度与土壤湿度双因子的协同作用能更好的阐明土壤呼吸各组分的变异规律。与对照相比,其他营林措施的土壤温度和土壤湿度对凋落物呼吸 RL 的协同作用减弱。不同于 RL,不同营林措施下土壤温度、土壤湿度与根呼吸 RR 和矿质土壤呼吸 RM 的关系并未表现出一致性,采伐 2 措施提高了土壤温湿度对于 RR 和 RM 的协同作用,温湿度能共同解释 RR 和 RM 的 50.2% 和 59.3%, 分别高出对照 13.4% 和 35%, 而除灌措施则相反。较之对照,采伐 1 降低了土壤温湿度对于 RR 的影响,但提高了土壤温湿度对于 RM 的复合作用。

4 讨论

4.1 不同措施下土壤呼吸总量及其组分变化

营林措施通常会造地上碳储量和碳通量的显著改变,但是其对于土壤的碳通量影响目前并未达到统一的结论^[20]。本研究中,营林措施实施后至第 1 个生长季结束时,3 种营林措施对森林土壤总呼吸的影响差异

明显(图 1,表 2)。除灌措施的森林土壤总呼吸 R_{tot} 降低了 17.74%,采伐 2 措施的森林土壤总呼吸 R_{tot} 提高了 17.34%,采伐 1 措施对森林土壤总呼吸 R_{tot} 没有产生明显的影响。进一步分析表明,不同营林措施下根呼吸 RR 和矿质土壤呼吸 RM 是土壤总呼吸的主要组成部分,两者对于总呼吸的贡献率均分别在 35.75%—40.44%和 37.00%—45.63%之间,而凋落物呼吸贡献率则在 18.62%—23.70%之间。其中,除灌措施主要是降低了矿质土壤呼吸 RM 和根呼吸 RR,采伐 2 措施则主要是提高了矿质土壤呼吸 RM,而对根呼吸没有产生明显影响,采伐 1 措施虽然也显著提高了矿质土壤呼吸 RM,但又同时显著降低了根呼吸 RR。因此,不同营林措施后森林土壤总呼吸 R_{tot} 差异显著,主要是由于不同营林措施对矿质土壤呼吸 RM 和根呼吸 RR 的影响存在差异造成的。

表 7 不同营林措施土壤温度(T)、土壤湿度(W)与土壤呼吸组分的复合模型参数

Table 7 Composite model parameters derived for the combined influence of soil temperature (T) and moisture (W) on the soil respiration components from different forest management

营林措施 Forest management	参数 Parameter	凋落物层呼吸速率 RL Litter layer Respiration				根系呼吸速率 RR Root respiration				矿质土壤呼吸速率 RM Mineral soil respiration			
		数值 Value	标准误 SE	R^2	P	数值 Value	标准误 SE	R^2	P	数值 Value	标准误 SE	R^2	P
对照(CK)	c_1	-0.691	0.676	0.271	<0.01	-0.647	0.449	0.368	<0.01	-1.709	0.512	0.243	<0.01
Control	c_2	-0.026	0.041			0.034	0.027			0.129	0.035		
	c_3	-0.130	0.055			-0.056	0.036			0.012	0.032		
	c_4	0.009	0.003			0.004	0.002			-0.002	0.002		
除灌(SM)	c_1	-1.357	0.391	0.046	0.119	-1.844	0.397	0.358	<0.01	-0.865	0.471	0.200	<0.01
Shrubs-cutting	c_2	0.020	0.026			0.078	0.026			0.011	0.032		
	c_3	0.005	0.036			0.023	0.036			-0.044	0.034		
	c_4	0.000	0.002			0.000	0.002			0.003	0.002		
采伐 1(H1)	c_1	-3.234	0.722	0.185	<0.01	-1.427	0.429	0.211	<0.01	-2.056	0.425	0.553	<0.01
Harvest 1	c_2	0.124	0.042			0.068	0.025			0.101	0.029		
	c_3	0.089	0.054			0.035	0.032			0.039	0.026		
	c_4	-0.004	0.003			-0.002	0.002			-0.001	0.002		
采伐 2(H2)	c_1	-0.812	1.011	0.107	<0.01	-1.273	0.626	0.502		-1.519	0.713	0.593	<0.01
Harvest 2	c_2	-0.038	0.047			0.074	0.029			0.087	0.030		
	c_3	-0.038	0.047			-0.011	0.029			-0.005	0.032		
	c_4	0.004	0.002			0.000	0.001			0.000	0.001		

不同营林措施并未造成凋落物层呼吸速率 RL 的显著差异,这与相关研究不同。孟春等研究表明择伐后 4 年针阔混交林生长季 RL 呈逐年增加的趋势,且与采伐强度呈正相关^[21];刘可等发现不同择伐强度的油松幼龄林人工林生长季 RL 显著高于对照,但 RL 值与采伐强度无相关关系^[22]。上述研究均认凋落物的分解与土壤温度、湿度显著相关^[23],采伐造成了土壤温度的显著上升和湿度的显著下降,从而导致凋落物层呼吸速率的显著变化。而本研究中采伐 1 和除灌干扰强度小,并未造成土壤温度和湿度的显著变异性,而干扰程度较大的采伐 2,土壤在温度升高的同时,湿度也显著上升,RL 无明显差异可能是土壤温度和水分综合作用的结果(表 4),此外,研究结果的不同也可能源于不同的森林类型下凋落物的质量的差异,针叶林分解速率低于针阔混交林^[24],较短的观测期时间(1 年)内,可能 RL 的差异性并不显著。

营林措施对于根呼吸速率 RR 的影响可能是正效应也可能是负效应^[20],采伐后地上植被的减少会直接降低地下的活根生物量进而造成 RR 的减少,但地上植被减少后,充足的养分会促进剩余植被的生长,导致活根生物量的增加进而造成 RR 的增加^[6]。本研究中 H2 与 CK 的 RR 无显著差异,可能是上述正负效应综合作用的结果。除灌和采伐 1 措施主要是清除了灌木和林下树种,这些植被的生物量占整个林分的比重较低,清除后对剩余植被养分利用的影响有限,但这些植被细根比重较大,而且分布较浅,清除后可能会显著降低林分

表层土壤根系生物量,尤其是灌木,这是否是除灌和采伐 1 措施下根呼吸 RR 显著低于 CK 原因,仍需进一步进行调查证实。

不同的营林措施造成了矿质土壤呼吸 RM 显著的差异性($p < 0.005$),RM 从大到小依次为 H2 ($1.27 \pm 0.07 \mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) > H1 ($1.17 \pm 0.07 \mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) > CK ($0.95 \pm 0.06 \mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) > SM ($0.75 \pm 0.05 \mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。RM 的变化与土壤微生物的活动和底物的供应有关。采伐后,遗留在林地上的伐根死亡并开始分解,为矿质土壤的呼吸增加了底物;同时,地上活立木的减少,改变了林内微环境,为土壤微生物活动创造了适宜的条件,使得矿质土壤呼吸增加^[25-26]。不同于采伐措施,除灌措施对剩余物进行了仔细的清除,地表直接暴露在空气中,缺乏灌木对于阳光和雨水的调节,但监测结果表明,在除灌的第一年内地表年平均温湿度与 CK 没有显著差异(表 4),造成除灌后 RM 显著降低的原因可能是土壤微生物生物量或群落结构发生了变化,这些需要下一步深入研究进行证实。不同营林措施下, RM 对土壤呼吸的贡献率较高,且采伐措施下 RM 的贡献率显著高于对照和除灌, RM 的差异是造成采伐与对照土壤呼吸速率差异的主要原因。

4.2 土壤呼吸组分与土壤温湿度

多数研究表明,土壤呼吸与土壤温度呈现显著地相关关系^[10-11, 27-28],其季节变化与气温、物候、植物的生理活动、微生物活性等密切相关^[29]。本研究中,土壤呼吸各组分均与土壤温度有着显著地正相关关系。不同营林措施下土壤温度月均值变化呈单峰趋势于 7 月达到最大值, RM、RR 的月均值与土壤温度变化呈现相同的趋势,均在生长旺盛期 7—8 月达到最大值,与相关研究一致^[22]。而 RL 则呈现出一定的波动性,在生长旺盛期 6—9 月间达到最大值。营林措施从不同程度改变了凋落物层对于土壤呼吸底物的 C 供应,使得土壤温度对不同营林措施 RL 的变化解释度降低(表 5)。与 RL 相比,土壤温度能更好的解释 RR 的变化,是造成 H2 的总呼吸高于其他措施最主要的原因。

在观测期内,土壤湿度并未表现出明显的季节变化,不同营林措施下, H2 造成了土壤湿度均值的显著增加, H1 和 SM 的土壤湿度均值略高于 CK(表 3)。同时,土壤湿度仅能解释部分土壤呼吸组分的变化(表 6)。土壤湿度会影响土壤中溶解性有机质的变化、植物和微生物能量的分配,并且对植物和微生物能量的分配产生作用^[30],因此对土壤呼吸的影响更为复杂。本研究结果与相关研究一致。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%^[31];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^[32]。

相较于单一因子,土壤温度与土壤湿度的双因子模型能更好的说明不同营林措施下土壤呼吸组分的变化^[7, 10],如土壤温湿度共同解释了东北小兴安岭地区择伐后生长季针阔混交林土壤组分呼吸调变化的 55%—99%^[21],山西太岳山择伐后幼龄林人工油松林土壤呼吸组分变化的 46.4%—99.3%^[22],但本研究中剔除解释率最低的 RL 外,土壤湿度的仅能解释土壤呼吸组分变化的 20.0%—59.3%(表 7),鉴于目前有限的研究,并未能找到造成该本文结果与其他研究结论差异的具体原因,仍需进行进一步的调查分析。但本结果在一定程度上反映出土壤温湿度并不是营林后土壤呼吸组分变化的主要原因,应对其他因子,如光照、降雨、微生物组成、活性、植被生长状况等进行全面的调查,同时加强对营林后土壤呼吸组分的长期观测,短期内仅能观测到不同呼吸组分的初步动态变化,长期连续的观测才能找到营林后土壤呼吸组分变化的机制。

5 结论

3 种营林措施对森林土壤呼吸组分的影响差异明显。不同营林措施下 RL 无显著变化;除灌措施显著降低了林分的根呼吸 RR 和矿质土壤呼吸 RM;采伐 1 措施虽然也显著提高了矿质土壤呼吸 RM,但又同时显著降低了根呼吸 RR;措施采伐 2 措施则主要是提高了矿质土壤呼吸 RM,而对根呼吸没有产生明显影响。

同时本研究对不同经营措施后土壤温度和湿度因子进行了探讨,但土壤温湿度仅能解释土壤呼吸主要组分 RR 和 RM 的部分变化(20%—59.3%),仍需对其它相关因子如降雨、光照、微生物组成结构等进行深入的研究,同时对营林后土壤呼吸速率及其组成进行长期连续的监测以确定营林干扰对不同土壤组分的影响

机制。

总之,在营林措施实施后至第 1 个生长季结束时,除灌措施使森林土壤总呼吸 R_{tot} 降低了 17.74%,采伐 2 措施使森林土壤总呼吸 R_{tot} 提高了 17.34%,而采伐 1 措施对森林土壤总呼吸 R_{tot} 没有产生明显的影响。针对三峡库区大面的人工飞播林,经过 30—40 年的自然生长后,定期对林下植被进行清理将有利于减少降低林分土壤呼吸,而对部分成熟林的采伐利用,在短期内会增加林分的土壤呼吸。

致谢:感谢湖北秭归三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站对于本研究的支持,同时感谢纽芬兰纪念大学的栾军伟博士对本文英文摘要撰写提供的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [2] Williams C A, Vanderhoof M K, Khomik M, Ghimire B. Post-clearcut dynamics of carbon, water and energy exchanges in a midlatitude temperate, deciduous broadleaf forest environment. *Global Change Biology*, 2013, 20(3): 992-1007.
- [3] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, Solomon A M, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [4] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [5] Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, Bauwens B, Baritz R, Hagedorn F, Johnson D W, Minkinen K, Byrne K A. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?. *Geoderma*, 2007, 137(3/4): 253-268.
- [6] Ma S Y, Chen J Q, North M, Erickson H E, Bresee M, Le Moine J. Short-term effects of experimental burning and thinning on soil respiration in an old-growth, mixed-conifer forest. *Environmental Management*, 2004, 33(S1): S148-S159.
- [7] Tang J W, 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(1): 57-66.
- [8] Saunders M, Tobin B, Black K, Gloria M, Nieuwenhuis M, Osborne B A. Thinning effects on the net ecosystem carbon exchange of a Sitka spruce forest are temperature-dependent. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157: 1-10.
- [9] 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.
- [10] Olajuyigbe S, Tobin B, Saunders M, Nieuwenhuis M. Forest thinning and soil respiration in a Sitka spruce forest in Ireland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157: 86-95.
- [11] Concilio A, Ma S Y, Li Q L, LeMoine J, Chen J Q, North M, Moorhead D, Jensen R. Soil respiration response to prescribed burning and thinning in mixed-conifer and hardwood forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(7): 1581-1591.
- [12] Laporte M F, Duchesne L C, Morrison I K. Effect of clearcutting, selection cutting, shelterwood cutting and microsites on soil surface CO_2 efflux in a tolerant hardwood ecosystem of northern Ontario. *Forest Ecology and Management*, 2003, 174(1/3): 565-575.
- [13] Fleming R L, Laporte M F, Hogan G D, Hazlett P W. Effects of harvesting and soil disturbance on soil CO_2 efflux from a jack pine forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36(3): 589-600.
- [14] Bowden R D, Nadelhoffer K J, Boone R D, Melillo J M, Garrison J B. Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23(7): 1402-1407.
- [15] Lee N Y, Koo J W, Noh N J, Kim J, Son Y. Autotrophic and heterotrophic respiration in needle fir and *Quercus*-dominated stands in a cool-temperate forest, central Korea. *Journal of Plant Research*, 2010, 123(4): 485-495.
- [16] 肖文发, 雷静品. 三峡库区森林植被恢复与可持续经营研究. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(2): 138-144.
- [17] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 黄玲玲, 谭本旺. 三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 445-451.
- [18] Luan J W, Liu S R, Zhu X L, Wang J X, Liu K. Roles of biotic and abiotic variables in determining spatial variation of soil respiration in secondary oak and planted pine forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 44(1): 143-150.
- [19] 褚金翔, 张小全. 川西亚高山林区三种土地利用方式下土壤呼吸动态及组分区分. *生态学报*, 2006, 26(6): 1693-1700.

- [20] Peng Y Y, Thomas S C, Tian D. Forest management and soil respiration: Implications for carbon sequestration. *Environmental Reviews*, 2008, 16 (NA): 93-111.
- [21] 孟春, 王立海, 沈微. 择伐对生长季针阔混交林土壤分室呼吸的影响. *林业科学*, 2008, 44(8): 23-28.
- [22] 刘可, 韩海荣, 康峰峰, 程小琴, 宋娅丽, 周彬, 李勇. 山西太岳山油松人工林生长季土壤呼吸对择伐强度的响应. *生态学杂志*, 2013, 32(12): 3173-3181.
- [23] 葛晓改, 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 谭本旺, 周本智. 土壤温度和水分含量对三峡库区马尾松林凋落物叶分解的影响. *林业科学*, 2013, 49(9): 153-157.
- [24] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 曹裕松. 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 77-83.
- [25] Epron D, Ngao J, Granier A. Interannual variation of soil respiration in a beech forest ecosystem over a six-year study. *Annals of Forest Science*, 2004, 61(6): 499-505.
- [26] 孟春, 王立海, 沈微. 择伐对小兴安岭地区针阔混交林土壤呼吸温度敏感性的影响. *林业科学*, 2011, 47(3): 102-106.
- [27] 刘颖, 韩士杰, 胡艳玲, 戴冠华. 土壤温度和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1581-1585.
- [28] 朱凡, 王光军, 田大伦, 闫文德, 项文化, 梁小翠. 马尾松人工林根呼吸的季节变化及影响因子. *林业科学*, 2010, 46(7): 36-41.
- [29] Ngao J, Epron D, Delpierre N, Bréda N, Granier A, Longdoz B. Spatial variability of soil CO₂ efflux linked to soil parameters and ecosystem characteristics in a temperate beech forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154-155: 136-146.
- [30] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*, 2003, 23(5): 972-978.
- [31] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 李洪建. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2009, 29(12): 6366-6376.
- [32] 罗璐, 申国珍, 谢宗强, 周利光. 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. *植物生态学报*, 2011, 35(7): 722-730.