

网络出版时间:2016-06-08 16:21 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.07.018
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160608.1621.036.html

去除凋落物对不同林龄油松次生林 土壤呼吸的影响

于 舒,韩海荣,康峰峰,赵金龙,
立天宇,高 晶,宋小帅

(北京林业大学 林学院,北京 100083)

【摘 要】 【目的】探究 3 个龄级油松天然次生林去除凋落物后生长季土壤呼吸速率对环境因素的响应。【方法】采用 LI-8100 土壤碳通量仪测定中龄林(HF)、近熟林(NF)、成熟林(MF)3 个龄级油松天然次生林生长季总土壤呼吸速率、去除凋落物后土壤呼吸速率,并同步采用自带的土壤温湿度传感器测定 5 cm 深度处的土壤温度(T)和湿度(W)、近地面大气温度(T_a)和相对湿度(RH);采用氯仿熏蒸浸提法测定 5 cm 深处土壤微生物量碳(MBC)。【结果】各林龄油松林土壤呼吸速率及其环境因子均呈明显的季节变化,表现为 6—8 月较高,5 月和 9 月较低。测量期间,油松 HF、NF、MF 去除凋落物处理的土壤呼吸速率平均值分别为 2.45、2.62 和 1.85 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,分别比未去除凋落物的对照处理的 3.69、3.23、3.48 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下降 33.4%、18.8%和 47.0%。对照试验条件下,各油松林土壤呼吸速率采用双变量 T 、 W 模型拟合时效果较好($R^2=0.464\sim 0.821$);去除凋落物试验条件下,各油松林水热因子对土壤呼吸速率的影响较小,MBC 对土壤呼吸速率的影响较大,在油松 NF、MF 林分中均达到显著水平。对照试验条件下,各油松林土壤 5 cm 深度处的温度敏感性系数 Q_{T10} 值随着林龄的增加而减少;去除凋落物试验条件下,除油松 NF 的大气温度敏感性系数 Q_{TA10} 升高外,其他林龄油松林温度敏感性系数 Q_{T10} 均降低。【结论】对照试验条件下,水热因子交互作用是土壤呼吸速率变化的主导因子;去除凋落物试验条件下,土壤湿度和 MBC 是导致各林龄油松林土壤呼吸速率差异的关键因子,较高的土壤水分和 MBC 更有利于凋落物分解释放 CO_2 。

【关键词】 林龄;土壤呼吸速率;土壤温湿度;土壤微生物量碳;凋落物

【中图分类号】 S718.52

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)07-0122-09

Effects of litter removal on soil respiration *Pinus tabulaeformis* natural secondary forests at different ages

YU Shu, HAN Hairong, KANG Fengfeng, ZHAO Jinlong,
LI Tianyu, GAO Jing, SONG Xiaoshuai

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】 The purpose of this study was to explore the response of soil respiration rates to environmental factors after litter removal in *Pinus tabulaeformis* stands at three different ages during growing season. 【Method】 Using LI-8100 soil carbon flux instrument, soil respiration rates, soil temperature (T) and moisture (W) at 5 cm depth, atmospheric temperature (T_a) and relative humidity (RH) above ground in half-mature *P. tabulaeformis* forest (HF), near-mature *P. tabulaeformis* forest (NF), and mature *P. tabulaeformis* forest (MF) of two treatments (blank control and litter removal test) were measured dur-

【收稿日期】 2014-11-21

【基金项目】 国家林业局林业公益性行业科研专项“森林生态服务功能分布式定位观测与模型模拟”(201204101)

【作者简介】 于 舒(1989—),女,黑龙江哈尔滨人,硕士,主要从事森林生态研究。E-mail:ys7805@bjfu.edu.cn

【通信作者】 韩海荣(1963—),男,青海西宁人,教授,博士,博士生导师,主要从事森林生态研究。E-mail:hanhr@bjfu.edu.cn

ing growing season. Soil microbial biomass carbon (MBC) at 5 cm depth was extracted using chloroform fumigation extraction method. 【Result】 Soil respiration rates and their environmental factors in *P. tabulaeformis* forests showed significantly seasonal patterns, with higher values during June to August and lower values during May and September. Average soil respiration rates in HF, NF and MF *P. tabulaeformis* forests under the litter removal treatment were 2.45, 2.62 and 1.85 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, decreased by 33.4%, 18.8% and 47.0% compared to those of the control. Under natural conditions, two-factor regression models (soil temperature and soil humidity) of soil respiration rate had better fitting results (R^2 values ranging from 0.464 to 0.821) than single-factor models. Under litter removal treatments, water and heat had smaller influences on soil respiration rates, while MBC had large effects with significant relationship between soil respiration rate and MBC reached in NF and MF *P. tabulaeformis* forests. Under natural conditions, the soil temperature sensitivity coefficient Q_{T10} decreased with the increase of forest age. Under litter removal conditions, all temperature sensitivity coefficient Q_{10} values decreased while only atmospheric temperature sensitivity coefficient Q_{TA10} in NF *P. tabulaeformis* forest increased. 【Conclusion】 Interaction between water and heat was the major factor affecting soil respiration rates in normal conditions, while soil moisture and MBC were the key factors under removing litter condition. Higher soil moisture and MBC tended to release more CO_2 from litters.

Key words: forest age; soil respiration rate; soil temperature and humidity; soil microbial biomass carbon; litter

土壤是陆地生态系统中最大且周转时间最慢的碳库^[1]。森林土壤呼吸是土壤碳库向大气排放 CO_2 的重要途径^[2], 森林土壤呼吸微小的变化都可以影响大气 CO_2 浓度。凋落物是土壤碳库的重要组成部分, Raich 等^[3] 估算全球土壤呼吸释放 CO_2 通量约为 68 Pg/年, 其中约有 50 Pg/年来自于凋落物和土壤有机质分解^[4]。凋落物输入^[5-6] 及其环境因子的变化都可能引起土壤呼吸速率及温度敏感性的改变, 不同区域和林分去除凋落物的试验为揭示凋落物对土壤呼吸的影响机制提供了证据。

水热因子通过影响土壤微生物活性以及根系和土壤动物等活动, 进而影响土壤呼吸。研究表明, 去除凋落物会显著降低土壤呼吸速率^[7-8], 但水热条件的变化不足以导致土壤呼吸发生变化^[8-10], 而是通过土壤养分的有效性、土壤微生物量以及微环境的变化来影响土壤生物, 进而使土壤碳库和碳循环发生变化^[11-12], 并且这些变化因气候、凋落物性质、微生物和土壤动物而异^[13]。目前, 国内关于去除凋落物的研究多集中在杉木^[8]、油松^[9]、枫香和樟树^[14]、杉木和米老排^[15]上, 主要分析水热条件对土壤呼吸的影响, 而对于生物因子的影响研究较少, 尤其缺乏关于这 2 种因素对油松林土壤呼吸影响的研究报道。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是暖温带湿润半湿润气候区的地带性植被, 是我国温性针叶林中分布

最广泛的森林群落^[16]。本试验以河北辽河源地区 3 个林龄油松天然次生林为研究对象, 通过设置不去除凋落物(对照)和去除凋落物 2 种处理, 研究 3 个林龄油松林土壤呼吸月动态影响因子, 对影响各林龄油松林 2 种处理下土壤碳释放强度和模式的温湿度、土壤微生物量碳进行探讨, 以期为更准确地评估该地区油松林地生态系统碳收支提供科学依据和基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然条件

本研究于 2013 年 5—9 月在河北省辽河源大窝铺林场(118°22'~118°37' E, 41°01'~41°21' N)进行。该地区处于暖温带向寒温带过渡地带, 属于半湿润半干旱大陆性季风型山地气候, 年均气温 7.3℃, 年平均降雨量 550 mm, 年平均蒸发量 1 800 mm, 湿润度为 0.4。土壤主要是棕壤土和褐土, 土层深厚, 凋落物层厚 1.2~6 cm。林分类型主要为油松天然次生林, 其主要伴生种为辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、蒙椴(*Tilia mongolica*)等。

1.2 试验方法

试验林分为油松天然次生中龄林(HF)、近熟林(NF)、成熟林(MF), 其林龄分别约为 40、50 和 60

年。样地情况见表 1。

在 3 个龄级的油松天然次生林内分别设置 3 块 30 m×20 m 的固定样地,每个样地选取 1 m×1 m 小样方进行 A、B 2 种处理,每种处理设置 3 个重复。A 处理为对照,不去除凋落物;B 处理去除凋落物,每月定期除去小样方内新落下的凋落物。在各小样

方内均设置一个直径为 20 cm、高 10 cm 的 PVC 土壤呼吸环,露出地面 3.5 cm 左右。采用 LI-8100 在 5—9 月每月中下旬测定土壤呼吸速率 1 次,测量时间为 08:00—18:00,每个环重复测定 3 次,取每处理多次测定的平均值作为该处理的土壤呼吸速率。

表 1 辽河源大窝铺林场不同林龄油松天然次生林样的地基本特征

Table 1 Basic characteristics of sample plots in natural secondary *Pinus tabulaeformis* forests at different ages in Dawopu forest farm

龄级 Age-class	坡向 Exposure	坡位 Slope position	坡度/(°) Slope	海拔/m Elevation	密度/ (株·hm ⁻²) Density	郁闭度 Crown density	平均胸径/cm Average DBH
HF	东 East	上坡 Upgrade	25	958	1 034	0.45	17.24
NF	南 South	下坡 Downgrade	19	1 007	717	0.60	23.17
MF	西 West	下坡 Downgrade	19	1 066	917	0.55	25.00

在观测土壤呼吸速率的同时,同步采用自带的土壤温湿度传感器测定 5 cm 深土壤温度(*T*)和湿度(*W*),系统自动记录测定时的近地面大气温度(*T*_a)和相对湿度(*RH*)。

在 2013 年 5—9 月,与土壤呼吸测定的同一天采用土钻取土壤样品。每个样方内钻取 0~5 cm 深度对照和去除凋落物土壤样品各 1 份,3 种林龄油松林共计 18 份土壤样品。样品立即装入保温箱内带回实验室置于 4 ℃ 下贮存,采用氯仿熏蒸浸提法^[17]测定土壤微生物量碳(soil microbial biomass carbon,MBC)。

1.3 计算公式

凋落物呼吸速率计算公式为:

$$LR=R_s-R_b.$$
(1)

式中:*LR* 为凋落物呼吸速率,*R_s* 为对照(保留枯枝落叶层)的土壤呼吸速率,μmol/(m²·s),*R_b* 为去除凋落物(去除枯枝落叶层)后的土壤呼吸速率,μmol/(m²·s)。

综合考虑各模型的拟合效果,用线性方程拟合土壤呼吸速率与 MBC 的关系;采用如下模型^[18]拟合土壤呼吸速率与水热因子的关系以及基于 5 cm 深度土壤温度 *Q*₁₀ 值(*Q*_{T10})和近地面大气温度的 *Q*₁₀ 值(*Q*_{TA10}):

$$Sr=ae^{bTa},Sr=aRH^b,\ln Sr=a+bTa+cRH+d(Ta\times RH);$$
(2)

$$Sr=ae^{bT},Sr=aW^b,\ln Sr=a+bT+cW+d(T\times W);$$
(3)

$$Q_{10}=e^{10b}.$$
(4)

式中:*Sr* 表示土壤呼吸速率,*T_a* 表示大气温度,*RH* 表示大气相对湿度,*T* 表示 5 cm 深度土壤温度,*W*

表示 5 cm 深度土壤湿度,*a*、*b*、*c*、*d* 为待定参数。

MBC 用下式求得^[19]:

$$MBC=EC/0.38.$$
(5)

式中:*EC* 为熏蒸和未熏蒸土样浸提液有机碳的差值,0.38 为校正系数。

1.4 数据分析

采用 SPSS 18.0 软件的重复测量方差分析法(repeated measured ANOVA)检验土壤呼吸、水热因子的月变化;K-S 检验数据符合正态分布后,用独立样本 *T* 检验比较土壤、大气温湿度的差异显著性。采用 Sigmaplot 12.5 和 Excel 2010 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同林龄油松林土壤呼吸速率及环境因子

图 1—3 显示,从 6 月开始,土壤、大气温湿度及 MBC 不断增加然后下降,微生物以及根系活动的活跃程度也相应的先升高后降低,因而土壤呼吸速率也不断上升然后下降。从图 1—2 中可以看出,生长季内大气温度始终高于土壤温度,土壤呼吸速率的月变化与土壤温度变化趋势较相似,在 6—8 月生长季旺盛期较高。除 5、9 月份外,生长季土壤温度整体表现为:中龄林>近熟林>成熟林。

如图 1 所示,土壤湿度的季节变化因降水等原因呈现较大的变化幅度。近熟林的土壤湿度在 7 月达到最大(37.20%),并且高于中龄林和成熟林,对照土壤呼吸值也在 7 月达到最大值 4.98 μmol/(m²·s),除此之外,整个生长季近熟林的土壤湿度明显小于中龄林和成熟林,3 种林分的大气相对湿度也有相似的动态趋势,但月变化更复杂。由图 2 可知,在对照试验条件下,油松中龄林和成熟林的土

壤呼吸速率在 8 月达到最大值,分别为 5.86 和 5.13 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。整个生长季各油松林土壤呼吸速率的大小顺序是中龄林>成熟林>近熟林,均

值分别为 3.69, 3.48 和 3.23 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。从整体上来看,各林龄油松林土壤呼吸的季节变化是各环境因子季节变化的综合体现。

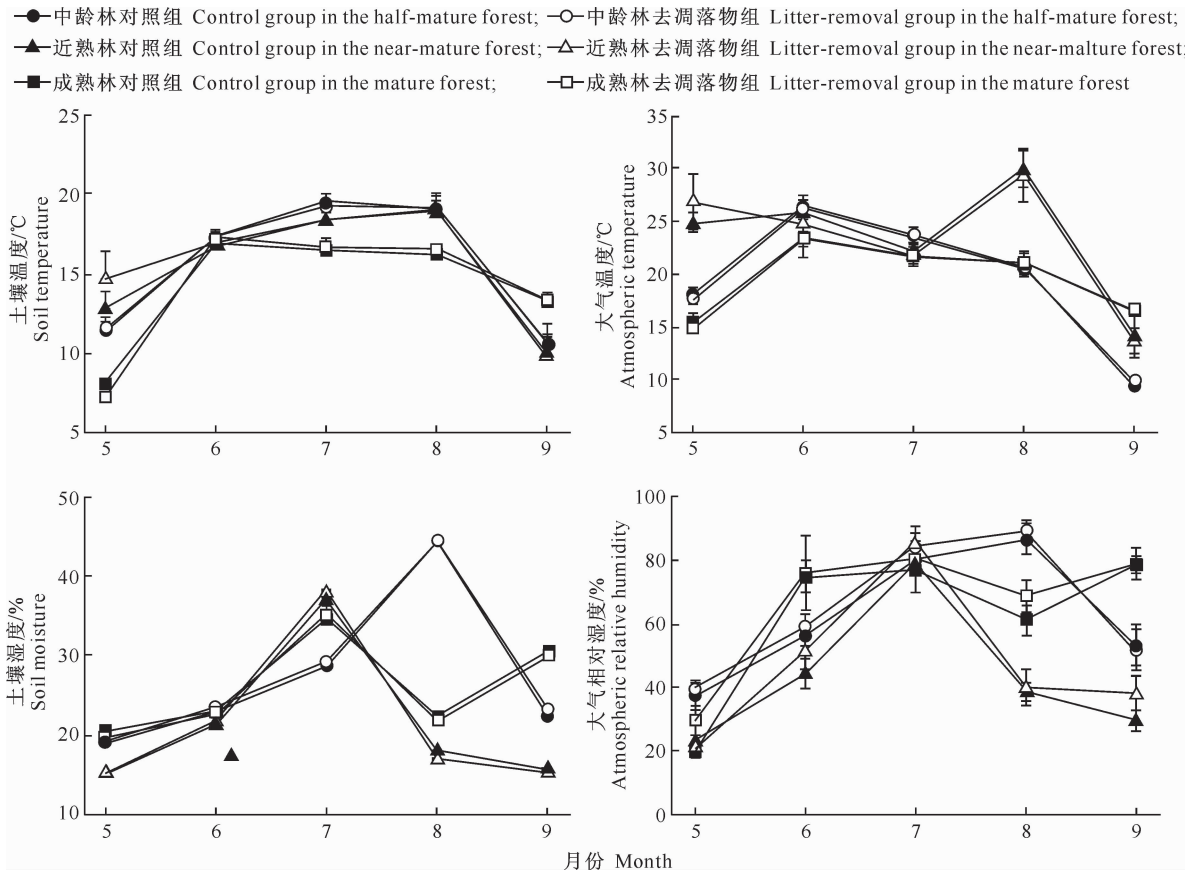


图 1 3 种林龄油松林土壤及大气温湿度的季节动态

Fig.1 Seasonal variations of soil temperature and moisture as well as atmospheric temperature and humidity in *Pinus tabulaeformis* forests with different ages

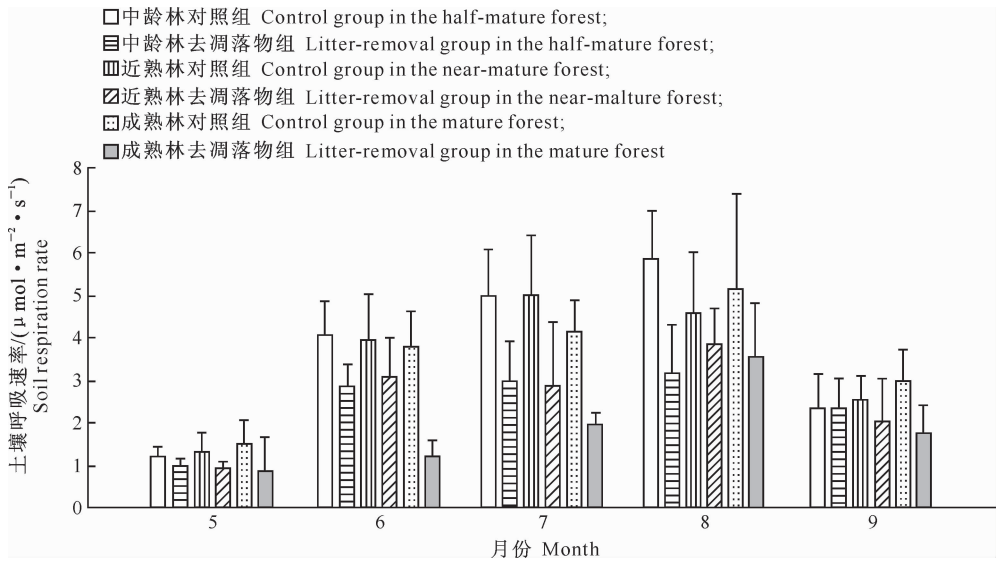


图 2 3 种林龄油松林生长季的土壤呼吸速率

Fig.2 Seasonal variations of soil respiration rates in *Pinus tabulaeformis* forests with different ages

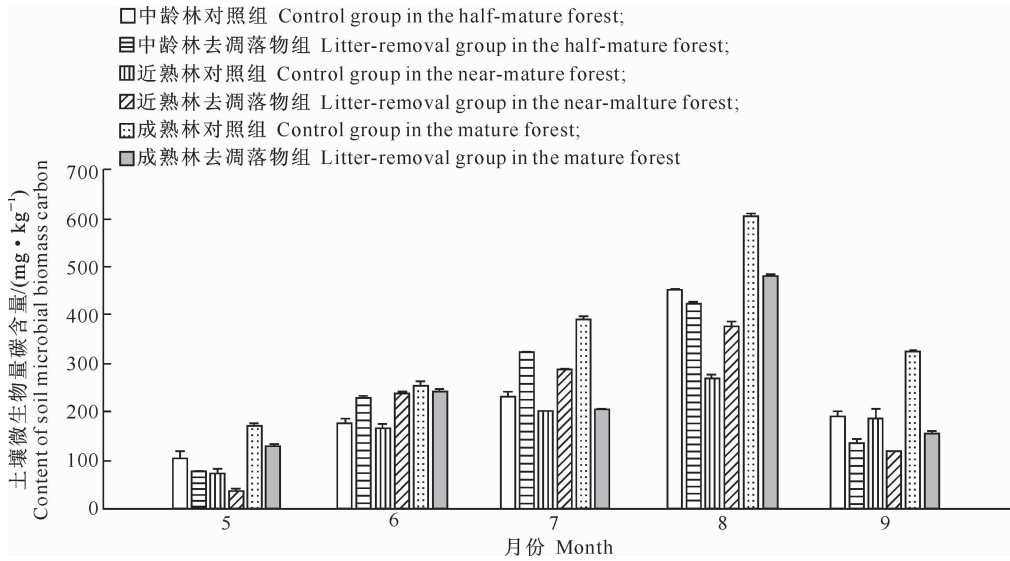


图 3 3 种林龄油松林生长季的土壤微生物量碳的变化

Fig. 3 Seasonal variations of microbial biomass carbon in *Pinus tabulaeformis* forests with different ages

由图 2 和图 3 可知,在去除凋落物试验条件下,不同林龄油松林土壤呼吸速率与 MBC 的月变化趋势最为相似,近熟林尤为明显,可能是由于凋落物覆盖阻碍了好气性细菌的活动^[19],在 6—8 月,去除凋落物的不同林龄油松林 MBC 明显升高,相应的土壤呼吸速率也升高。各林龄油松林土壤呼吸速率的大小顺序为近熟林>中龄林>成熟林,分别为 2.62,2.45 和 1.85 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2.2 不同林龄油松林土壤呼吸速率与大气和土壤温湿度的关系

从表 2 和表 3 可以看出,在对照试验条件下,除近熟林(NF)的大气温度模型外,各油松林土壤呼吸

速率与温湿度的拟合关系均达到显著水平。去除凋落物后,各林分模型的决定系数 R^2 明显降低,且在中龄林和近熟林中显著性水平也降低。在 2 种处理条件下,拟合土壤呼吸速率的大部分温湿度双因素模型优于单因素模型,对照处理大气温湿度、土壤温湿度分别可以解释各油松林土壤呼吸变化的 29.6%~78.3%和 46.4%~82.1%,去除凋落物处理可以分别解释 7.9%~39.2%和 18.1%~32.3%,较对照处理的解释能力降低。对 Q_{10} 值的研究发现,各林龄林分对照处理 Q_{TA10} 小于 Q_{T10} , Q_{T10} 随着林龄的增加而降低;去除凋落物后, Q_{10} 值均较对照降低,但近熟林的下降幅度较小。

表 2 不同林龄油松林土壤呼吸速率与近地面气温湿度的统计模型

Table 2 Statistical models of soil respiration rate with atmospheric temperature and humidity near ground in *Pinus tabulaeformis* forests at different ages

龄级 Age-class	对照处理 Control treatment				去除凋落物处理 Litter-removal treatment			
	模型 Model	Q_{TA10}	R^2	P	模型 Model	Q_{TA10}	R^2	P
HF	$Sr=0.797e^{0.078Ta}$	2.18	0.311	0.000	$Sr=1.455e^{0.025Ta}$	1.28	0.051	0.020
	$Sr=0.002RH^{1.767}$		0.832	0.000	$Sr=0.159RH^{0.637}$		0.152	0.000
	$\ln Sr=0.107-0.048Ta+1.4RH+0.1(Ta \times RH)$		0.783	0.000	$\ln Sr=1.897-0.154Ta-0.9RH+0.2(Ta \times RH)$		0.332	0.000
NF	$Sr=2.358e^{0.016Ta}$	1.17	0.012	0.210	$Sr=1.316e^{0.025Ta}$	1.28	0.021	0.070
	$Sr=0.282RH^{0.631}$		0.234	0.000	$Sr=1.078RH^{0.198}$		0.022	0.009
	$\ln Sr=0.585-0.017Ta-2.7RH+0.2(Ta \times RH)$		0.296	0.000	$\ln Sr=0.381-0.003Ta-2.4RH+0.1(Ta \times RH)$		0.079	0.000
MF	$Sr=0.635e^{0.084Ta}$	2.31	0.441	0.000	$Sr=0.448e^{0.074Ta}$	2.01	0.320	0.000
	$Sr=0.372RH^{0.577}$		0.203	0.000	$Sr=0.365RH^{0.428}$		0.063	0.000
	$\ln Sr=-2.201+0.153Ta+3.1RH-0.1(Ta \times RH)$		0.538	0.000	$\ln Sr=-3.585+0.211Ta+4.3RH-0.2(Ta \times RH)$		0.392	0.000

注: Sr . 土壤呼吸速率; Ta . 大气温度; RH . 大气相对湿度。
Note: Sr . Soil respiration rate; Ta . Atmospheric temperature; RH . Relative humidity of air.

表 3 不同林龄油松林土壤呼吸速率与 5 cm 深度土壤温湿度的统计模型

Table 3 Statistical models of soil respiration rate and soil temperature and humidity at 5 cm depth *Pinus tabulaeformis* forests at different ages

龄级 Age-class	对照处理 Control treatment				去除凋落物处理 Litter-removal treatment			
	模型 Model	Q_{T10}	R^2	P	模型 Model	Q_{T10}	R^2	P
HF	$Sr=0.380e^{0.133T}$	3.78	0.687	0.000	$Sr=1.031e^{0.049T}$	1.63	0.101	0.031
	$Sr=23.466W^{1.332}$		0.643	0.000	$Sr=4.702W^{0.494}$		0.123	0.000
	$\ln Sr=-7.120+0.391T+54.018W-1.977(T\times W)$		0.821	0.000	$\ln Sr=-1.967+0.048T+42.721W-1.550(T\times W)$		0.181	0.000
NF	$Sr=0.367e^{0.130T}$	3.67	0.392	0.000	$Sr=0.608e^{0.077T}$	2.16	0.102	0.023
	$Sr=15.858W^{0.975}$		0.305	0.000	$Sr=5.048W^{0.473}$		0.058	0.003
	$\ln Sr=4.446-0.130T-50.918W+3.308(T\times W)$		0.464	0.000	$\ln Sr=2.599+0.030T-42.924W+2.277(T\times W)$		0.242	0.000
MF	$Sr=0.540e^{0.120T}$	3.32	0.582	0.000	$Sr=0.777e^{0.066T}$	1.93	0.168	0.002
	$Sr=16.921W^{1.042}$		0.433	0.000	$Sr=7.029W^{0.822}$		0.239	0.000
	$\ln Sr=-3.399+0.596T+1.812W-0.545(T\times W)$		0.607	0.000	$\ln Sr=-3.707+0.535T+12.228W-1.334(T\times W)$		0.323	0.000

注:Sr.土壤呼吸速率;T.5 cm 深度土壤温度;W.5 cm 深度土壤湿度。
Note:Sr. Soil respiration rate;T. Soil temperature at 5 cm depth;W. Soil moisture at 5 cm depth.

2.3 不同林龄油松林土壤呼吸速率与 MBC 的关系

将 3 种林龄油松林的相关变量在去除凋落物前后对比发现:对照 MBC 越低的油松林,去除凋落物后 MBC 增加的幅度越大,而相应的土壤呼吸速率的降低程度越小(图 2—3)。去除凋落物后,近熟林的 MBC 较对照增加了 17.4%,土壤呼吸速率下降的相对值、绝对值分别为 18.8%和 0.608 μmol/(m²·s);其次为中龄林,MBC 较对照增加了 1.95%,土壤呼吸速率下降的相对值、绝对值分别为

33.4%和 1.232 μmol/(m²·s);最后为成熟林,MBC 较对照减少了 30.4%,土壤呼吸速率下降的相对值、绝对值分别为 47.0%和 1.638 μmol/(m²·s)。由此可见,不同林龄油松林土壤呼吸速率的下降可能与 MBC 的变化有关。从图 4 可以看出,去除凋落物后土壤呼吸速率与 MBC 的相关性均增强,中龄林、近熟林、成熟林的 MBC 分别可以解释土壤呼吸速率变化的 72.1%,94.6%和 81.5%。说明去除凋落物后,土壤微生物可能成为影响土壤呼吸的重要因子。

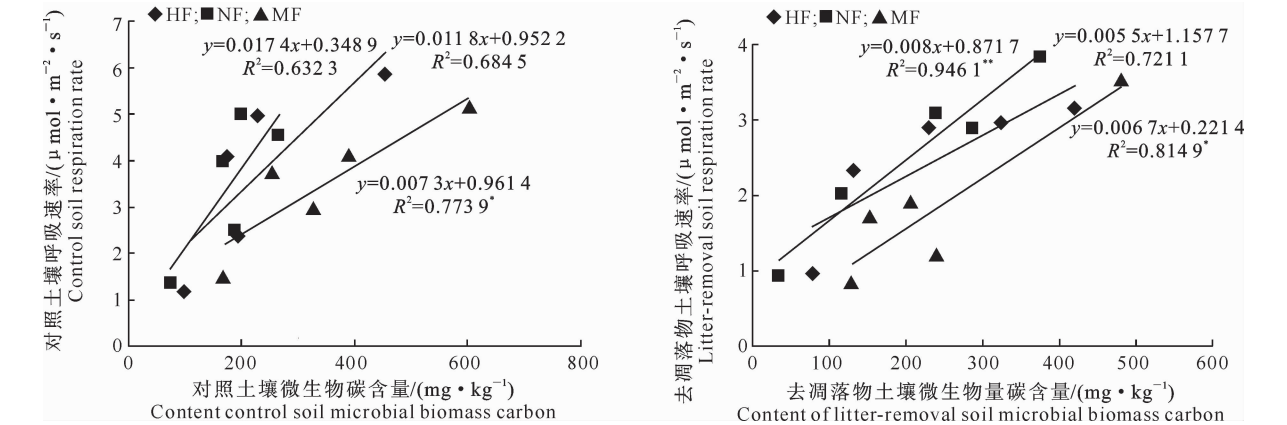


图 4 不同林龄油松林 2 种处理下土壤微生物量碳(MBC)与土壤呼吸速率(Sr)的关系

* 为显著水平 $P<0.05$; ** 为极显著水平 $P<0.01$

Fig. 4 Relationship between soil microbial biomass carbon (MBC) and soil respiration (Sr) under two treatments in *Pinus tabulaeformis* forests at different ages

* indicates significant at $P<0.05$; ** indicates extremely significant at $P<0.01$

3 结论与讨论

本研究发现,拟合不同林龄油松林土壤呼吸速

率的双因子 T 、 W 模型优于单因子模型和双因子 RH 、 Ta 模型,且 T 和 W 在一定范围内土壤呼吸速率随着 T 和 W 的升高而增加, T 或 W 超过一定范

围时均会抑制土壤呼吸,这与很多研究结果相符^[21-22]。因为 T 、 W 较 RH 、 T_a 更直接作用于凋落物及腐殖质的分解和养分释放循环,同时 T 、 W 对土壤呼吸的影响是几个复杂生态过程共同作用的结果^[23],不可能单独分离出土壤温度或者含水量效应^[24]。各林龄油松林 MBC 可以解释土壤呼吸速率变化的 63.2%~77.4%。由此推断,将 MBC 等生物因素并入 T 、 W 模型将会提高对土壤呼吸速率预测的准确性。

去除凋落物后各林龄油松林土壤呼吸速率的 T 、 W 模型的决定系数 R^2 降低,这与汪金松等^[9]对油松人工林和王光军等^[8]对杉木人工林的研究结论一致,而与王光军等^[14]对枫香和樟树的研究结论不一致。在不同生态系统中,凋落物的复杂生态作用在土壤呼吸的变化中影响不同。本研究中,不同处理 T 、 W 均无显著差异($P>0.05$),但去除凋落物后土壤呼吸明显下降,表明去除凋落物引起的 T 、 W 变化不是影响土壤呼吸速率下降的原因。因此,针对上述现象分析可能的原因是:凋落物层的微生物控制着土壤中主要的生物化学过程,在其分解后,可溶性有机物质可能促进微生物呼吸^[25]以及产生激发效应^[26];另外,凋落物对应的表层土壤更容易受到分解物和根系分泌物的影响。因此,凋落物可增加土壤温湿度对土壤呼吸的生态效应,去除凋落物后,土壤呼吸对土壤温湿度的响应降低。

本试验 Q_{T10} 值随着林龄的增加而减小,反映环境变化为生态系统的生物生存和发育创造了更有利的条件,从而可以更好地应对温度变化。在本研究中, Q_{T10} (3.32~3.78)与同纬度地区针叶林相近^[3,27],但去除凋落物后,各林龄油松林分 Q_{T10} 值均降低,这与汪金松等^[9]和余再鹏等^[15]的研究结果一致,而与王光军等^[8]的研究结果相反,表明土壤呼吸对去除凋落物的响应因测量时间、气候条件及森林类型而异。研究发现,近熟林的 Q_{10} 值下降幅度明显小于中龄林和成熟林。Janssens 等^[28]认为, Q_{10} 值不只是对温度敏感性的一种量度,而是对温度、根生物量和活性、水分条件和其他因子综合响应的结果。在温度条件相似的情况下, Q_{10} 值可能与水分和生物因子有关。近熟林较低的 W 和 MBC 可能导致凋落物自身呼吸的温度敏感性较低,从而引起相应 Q_{10} 的变化。

气候、凋落物性质、微生物、土壤动物是影响凋落物分解的最基本因素^[10]。很多研究表明,土壤水分通过影响凋落物的分解而影响凋落物呼吸^[29-31];

宋新章等^[30]研究表明,土壤水分是诸多气候因素里对凋落物分解影响最大的因子;刘勇等^[32]研究表明,不同林龄油松林的凋落物性质不足以影响凋落物分解率,因为凋落物分解率还受控于林内环境和土壤肥力。本研究中,近熟林的 T (15.47℃)与中龄林和成熟林 (15.61 和 14.17℃)接近,而 W (21.48%)和 MBC (179.34 kg/mg)明显小于两者的 W (27.55%和 26.20%)和 MBC (231.43 和 348.61 kg/mg),凋落物呼吸速率较低,为 $0.608 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,很可能是由于 W 较低,参与凋落物分解的土壤微生物的活性和数量也相应减少,从而降低了土壤呼吸速率;在去除凋落物后,好气性微生物的活性增加,MBC (210.58 kg/mg)反而上升了 17.5%。同样的,中龄林和成熟林在水热条件相似的情况下,成熟林较高数量和活性的微生物参与了凋落物分解,消耗较多的 MBC (47.01%),因此促进凋落物分解释放 CO_2 $1.638 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。有研究表明,土壤微生物量是土壤养分转化过程中重要的源和库^[33];同时,MBC 与有机碳、全 N、速效 N 等土壤养分呈正相关^[34-35]。而葛晓改等^[36]研究表明,土壤水分与凋落物分解速率的关系不明显,因此这种差异可能因气候条件、森林类型而异。由此可见,凋落物呼吸速率的差异很可能是 W 和土壤养分、MBC 相互作用的结果。

[参考文献]

- [1] 许乃政,刘红樱,魏峰.土壤碳库及其变化研究进展[J].江苏农业科学,2011,39(2):1-5.
Xu N Z, Liu H Y, Wei F. Research progress of soil carbon stock and its variety [J]. Journal of Jiangsu Agri Sci, 2011, 39(2): 1-5.
- [2] 陆彬,王淑华,毛子军,等.小兴安岭 4 种原始红松林群落类型生长季土壤呼吸特征[J].生态学报,2010,30(15):4065-4074.
Lu B, Wang S H, Mao Z J, et al. Soil respiration characteristics of four primary Korean pine communities in growing season at Xiaoxing'an Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 4065-4074.
- [3] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide efflux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus, 1992, 44(2): 81-99.
- [4] Xu S, Liu L, Sayer E J. Variability of aboveground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: a meta-analysis of litterfall-manipulation experiments [J]. Biogeo Sciences Discussions, 2013, 10(3): 5245-5272.
- [5] Liu L L, King J S, Giardina C P. Effects of elevated concentrations of atmospheric CO_2 and tropospheric O_3 on leaf litter pro-

- duction and chemistry in trembling aspen and paper birch communities [J]. *Tree Physiology*, 2005, 25: 1511-1522.
- [6] Kaneda S, Frouz J, Baldrian P, et al. Does the addition of leaf litter affect soil respiration in the same way as addition of macrofauna excrements (of *Bibio marci* Diptera larvae) produced from the same litter [J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 72: 7-13.
- [7] 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.
- Wang G J, Tian D L, Yan W D, et al. Response of soil respirations to litterfall exclusion and addition in *Pinus massoniana* plantation [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(1): 27-30.
- [8] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 739-747.
- Wang G J, Tian D L, Yan W D, et al. Effects of above ground litter exclusion and addition on soil respiration in a *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4): 739-747.
- [9] 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.
- Wang J S, Zhao X H, Zhang C Y, et al. Changes of carbon input influence soil respiration in a *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(9): 2768-2777.
- [10] 武传胜, 沙丽清, 张一平. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林凋落物对土壤呼吸及其温度敏感性的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(6): 37-40.
- Wu C S, Sha L Q, Zhang Y P. Effect of litter on soil respiration and its temperature sensitivity in a montane evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(6): 37-40.
- [11] 王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 1075-1081.
- Wang Q K. Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 1075-1081.
- [12] Li Y Q, Xu M, Sun O J, et al. Effects of root and litter exclusion on soil CO₂ efflux and microbial biomass in wet tropical forests [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(12): 2111-2114.
- [13] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展 [J]. *林业科学*, 2006, 42(4): 93-100.
- Guo J F, Yang Y S, Chen G S, et al. A review on litter decomposition in forest ecosystem [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(4): 93-100.
- [14] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 去除和添加凋落物对枫香 (*Liquidambar formosana*) 和樟树 (*Cinnamomum camphora*) 林土壤呼吸的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 39(2): 643-652.
- Wang G J, Tian D L, Yan W D, et al. Impact of litter addition and exclusion on soil respiration in a *Liquidambar formosana* forest and a nearby *Cinnamomum camphora* forest of central southern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 39(2): 643-652.
- [15] 余再鹏, 万晓华, 胡振宏. 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应 [J]. *生态学报*, 2014, 34(10): 2529-2538.
- Yu Z P, Wan X H, Hu Z H, et al. Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10): 2529-2538.
- [16] 汪金松, 范娟, 赵秀海, 等. 太岳山油松人工林土壤呼吸组分及其影响因子 [J]. *林业科学*, 2013, 49(2): 1-7.
- Wang J S, Fan J, Zhao X H, et al. Soil respiration components and its controlling factors in a *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(2): 1-7.
- [17] 邸雪颖, 耿莹莹, 孙龙, 等. 兴安落叶松林土壤微生物生物量季节动态及影响因素 [J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(5): 1-4.
- Di X Y, Geng Y Y, Sun L L, et al. Soil microbial biomass dynamics and influence factors in *Larix gmelinii* forest in Daxing'an Mountains [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(5): 1-4.
- [18] 胡宗达. 亚高山灌丛和草甸土壤呼吸动态特征及其影响因素 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- Hu Z D. Dynamics and controls factors of soil respiration in a subalpine shrub stands and meadow, China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 156-157.
- Lu R K. Analysis method of soil gricultural chemistry [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999: 156-157.
- [20] 陈四清, 崔晓勇, 周广胜, 等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO₂ 排放速率研究 [J]. *植物学报*, 1999, 41(6): 645-650.
- Chen S Q, Cui X Y, Zhou G S, et al. Study on the CO₂-release rate of soil respiration and litter decomposition in *Stipa grandis* Steppe in Xilin River Basin, Inner Mongolia [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(6): 645-650.
- [21] Curiel Yuste J, Janssens I A, Carrara A, et al. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest [J]. *Tree Physiology*, 2003, 23: 1263-1270.
- [22] Conant R T, Klopatek J M, Klopatek C C. Environmental factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2000, 64: 383-390.
- [23] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应 [J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 583-591.
- Yang Y S, Dong B, Xie J S, et al. Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 583-591.
- [24] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性 [J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1960-1968.
- Wang X G, Zhu B, Wang Y Q, et al. Soil respiration and its

- sensitivity to temperature under different land use conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1960-1968.
- [25] Lajtha K, Crow S E, Yano Y, et al. Detrital controls on soil solution N and dissolved organic matter in soils; a field experiment [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 76(2): 261-281.
- [26] Park J H, Kalbitz K, Matzner E. Resource control on the production of dissolved organic carbon and nitrogen in a deciduous forest floor [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(6): 813-822.
- [27] 牟守国. 温带阔叶林、针叶林和针阔混交林土壤呼吸的比较研究 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 564-570.
Mu S G. Respiration of soils under temperate deciduous, coniferous and mixed forests [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 564-570.
- [28] Janssens I A, Dore S, Epron D, et al. Climatic influences on seasonal and spatial differences in soil CO₂ efflux, in fluxes of carbon, water and energy of European forests [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [29] Chen Y Y. Root decomposition in three coniferous forests: effects of substrate quality, temperature and moisture [D]. Corvallis, Oregon: Oregon State University, 1999: 214.
- [30] 宋新章, 江 洪, 马元丹, 等. 中国东部气候带凋落物分解特征: 气候和基质质量的综合影响 [J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5220-5226.
Song X Z, Jiang H, Ma Y D, et al. Litter decomposition across climate zone in Eastern China: the integrated influence of climate and litter quality [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5220-5226.
- [31] Smith J L, Norton J M, Paul E A, et al. Decomposition of ¹⁴C- and ¹⁵N- labeled organisms in soil under anaerobic conditions [J]. *Plant and Soil*, 1989, 116: 115-118.
- [32] 刘 勇, 李国雷. 不同林龄油松人工林叶凋落物分解特性 [J]. *林业科学研究*, 2008, 21(4): 500-505.
Liu Y, Li G L. Decomposition characteristics affected by forest age in *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. *Forest Research*, 2008, 21(4): 500-505.
- [33] 周建斌, 陈竹君, 李生秀. 土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用 [J]. *生态学报*, 2001, 21(10): 1718-1723.
Zhou J B, Chen Z J, Li S X. Contents of soil microbial biomass nitrogen and its mineralized characteristics and relationships with nitrogen supplying ability of soils [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1718-1723.
- [34] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4113-4118.
Xu H Q, Zhang J E, Feng L F, et al. Effects of different land use patterns on microbial biomass carbon and nitrogen in Guangdong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4113-4118.
- [35] 逯军峰. 不同林龄油松人工林凋落物及其对土壤理化性质的影响研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007.
Lu J F. Litter and effect on soil physical and chemical properties in *Pinus tabulaeformis* plantations at different ages [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2007.
- [36] 葛晓改, 曾立雄, 黄志霖, 等. 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 [J]. *林业科学*, 2013, 49(9): 153-157.
Ge X G, Zeng L X, Huang Z L, et al. Effects of soil temperature and soil water content to needle litter leaf decomposition of *Pinus maossoniana* plantations in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(9): 153-157.