

DOI: 10.5846/stxb201703160449

彭信浩, 韩海荣, 徐小芳, 蔡锰柯, 白英辰, 程小琴. 间伐和改变凋落物输入对华北落叶松人工林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2018, 38(15): - .
Peng X H, Han H R, Xu X F, Cai M K, Bai Y C, Cheng X Q. Thinning treatment and litterfall changes influence soil respiration in a *Larix principis-rupprechtii* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): - .

间伐和改变凋落物输入对华北落叶松人工林土壤呼吸的影响

彭信浩, 韩海荣, 徐小芳, 蔡锰柯, 白英辰, 程小琴*

北京林业大学林学院, 北京 100083

摘要: 作为森林生态系统的第二大碳通量, 土壤呼吸在全球碳循环和气候变化中发挥着重要作用。通过探究土壤呼吸对间伐和改变凋落物的响应规律以及响应之间的联系, 能够为准确评价森林碳循环提供依据。针对不同强度(对照、轻度、中度、重度)间伐后的华北落叶松人工林, 2016年5月至10月采用LI-8100土壤碳通量测量系统对其原状、凋落物去除、凋落物加倍的土壤呼吸进行观测。结果表明: 土壤呼吸在生长季的8月份达到最高值, 呈现出明显的季节动态。不同林分间伐处理下, 中度间伐显著促进了土壤呼吸, 使平均土壤呼吸速率升高了15.66%, 轻度间伐和重度间伐对土壤呼吸的影响不显著; 不同凋落物处理下, 去除凋落物使平均土壤呼吸速率降低了40.16%, 加倍凋落物使平均土壤呼吸速率升高了16.06%。中度间伐使土壤呼吸生长季通量增加了55.06 g C/m²; 去除凋落物使土壤呼吸生长季通量减少了153.48 g C/m², 加倍凋落物使土壤呼吸生长季通量增加了79.87 g C/m²。土壤呼吸速率与土壤温度呈显著指数相关, 而与土壤湿度无显著相关。不同林分间伐处理下, 土壤呼吸的温度敏感性指数(Q_{10})为2.36—3.46, 轻度间伐下 Q_{10} 值最高; 凋落物去除和加倍均降低了土壤呼吸的温度敏感性。土壤温湿度对土壤呼吸存在着显著影响, 能够解释土壤呼吸28.7%—62.3%的季节变化。研究结果表明间伐和凋落物处理对华北落叶松人工林土壤CO₂释放的影响表现出一定的交互作用, 中度间伐和加倍凋落物的交互作用对土壤呼吸的促进作用显著大于单一因子。可见, 间伐作业通过改变土壤微环境和凋落物量, 对土壤呼吸以及森林生态系统碳循环产生着重要影响。

关键词: 华北落叶松; 间伐; 土壤呼吸; 凋落物

Thinning treatment and litterfall changes influence soil respiration in a *Larix principis-rupprechtii* plantation

PENG Xinhao, HAN Hairong, XU Xiaofang, CAI Mengke, BAI Yingchen, CHENG Xiaoqin*

Forestry College of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Soil respiration (R_s), the second largest site of carbon flow in the forest ecosystem carbon budget, plays an important role in the global carbon (C) cycle and climate change. Understanding the effects of forest management practices (e.g. thinning) on R_s is crucial for the accurate estimation of forest carbon cycling. Simultaneously, aboveground litter management practices (removal, addition, and so on) can also influence R_s . However, little is known about the response of R_s to thinning and its relationship with the changes in litter production induced by thinning. We aimed to quantify the response of R_s rate to different thinning intensities and to explore the relationships between R_s and soil temperature and moisture as a result of different litter management practices. A thinning manipulation experiment was conducted in a *Larix principis-rupprechtii* plantation in Shanxi province, China, with the following treatments: heavy thinning, moderate thinning, low thinning and no thinning. In addition, three treatments—litterfall removal, litter addition and normal

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0600205)

收稿日期: 2017-03-16; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cxq_200074@163.com

litterfall—were applied to analyze the relationship between differences in litter input and R_s . Rates of soil respiration were measured twice a month using the LI-8100 Automated Soil CO₂ Flux System from May to October 2016, while soil temperature and moisture at a depth of 5 cm were measured using temperature and moisture probes and data loggers. A significant difference was noted in R_s among the different thinning treatments ($P < 0.05$). Clear monthly variations in R_s were noted in the growing season, and R_s reached its peak value in August. Overall, moderate thinning increased R_s rate during the growing season by 15.7% from that of the no-thinning treatment. During the growing season, the R_s rate was lower by 40.16% with litterfall removal than that of normal litterfall; however, R_s rate was higher by 16.06% with litter addition than that of normal litterfall. Moderate thinning increased accumulative R_s by 55.06 g C/m² during the growing season. Under litter removal conditions, accumulative R_s decreased by 153.48 g C/m² during the growing season, while accumulative R_s increased with litter addition by 79.87 g C/m². During the growing season, R_s exhibited significant exponential relationships with soil temperature, while there were no significant differences in soil moisture among the various treatments. Temperature sensitivity (Q_{10}) values of R_s ranged from 2.36 to 3.46 in the various thinning intensities, with the highest Q_{10} value in the low thinning stand. The Q_{10} value were lower with the litter removal and litter addition treatments than those of normal litterfall. The interaction of soil temperature and moisture had a significant effect on R_s . The best fitting model with temperature and moisture explained 28%—62% of the variation in R_s . The results indicated that the interaction between thinning treatments and litter changes has a significant effect on the R_s in *L. principis-rupprechtii* plantations. The compound effect of moderate thinning and litter addition on R_s is significantly greater than that of any single factor. In conclusion, thinning played a considerable role in altering R_s and carbon cycle in forest ecosystems by influencing the soil micro-environment and litter production rates.

Key Words: *Larix principis-rupprechtii*; thinning; soil respiration; litter

作为大气 CO₂ 的重要来源,土壤呼吸是土壤碳库向大气输出的主要途径^[1],在陆地生态系统碳循环中起着非常重要的调控作用^[2],它的微小变化都可能会对大气 CO₂ 释放量和全球碳平衡产生显著影响^[3]。土壤呼吸主要分为根呼吸、土壤动物呼吸和土壤微生物呼吸三部分,Raich 和 Schlesinger 估算全球土壤释放 CO₂ 的通量为 68 Pg C a⁻¹,其中 50 Pg C a⁻¹ 来自凋落物和土壤有机质分解,18 Pg C a⁻¹ 来自活根和菌根的呼吸^[4]。

间伐作业会直接导致森林的结构类型发生改变,降低林分密度和叶面积,增加光照和营养的可利用率,改变土壤温湿度,进而影响土壤微生物群落和根系数量,从而对土壤呼吸产生一定的影响^[5]。Tang 等在美国内华达山脉研究发现当间伐作业使生物量减少 30% 时,土壤呼吸对温湿度的敏感性不变,土壤呼吸速率出现降低现象^[6]。刘保新等对华北油松 (*Pinus tabulaeformis*) 人工林的研究表明土壤呼吸随间伐强度的增强先升高后降低,中度间伐林分土壤呼吸速率最高^[7]。土壤呼吸的一个重要组成部分是植物凋落物的分解^[8],凋落物数量、组成及其分解速率在很大程度上影响着土壤有机质的形成和对植物养分的供应,并影响土壤水热条件^[9-10],同时也可能通过改变土壤生物数量和活性影响土壤碳库,直接或间接地影响土壤呼吸。凋落物对土壤呼吸的影响会因植被类型^[11]、试验周期^[12] 和干湿季变化^[13] 的差异而不同。Boone 等研究发现完全移走地上部分凋落物使土壤呼吸降低 25%,而凋落物加倍则使土壤呼吸增加近 20%^[14]。前人对黄土高原刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 人工林^[15]、云杉林 (*Picea crassifolia*)^[16]、油松人工林^[17]、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林和米楮 (*Castanopsis carlesii*) 次生林^[18] 等其他树种的研究均表明去除凋落物使土壤呼吸减弱,添加凋落物使土壤呼吸增强。间伐作业同样会留下大量凋落物,随着间伐强度的增强凋落物输入量会逐渐减少,而目前的间伐和凋落物试验都是相互独立的研究,忽视了其交互作用对土壤碳动态的影响。

华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 是中国华北地区山地暖温性针叶林带主要建群树种之一^[19],本研究通过华北落叶松人工林的间伐和改变凋落物处理试验,研究林分密度和凋落物对土壤呼吸的影响及其动态变化,探讨影响土壤碳释放模式和强度的环境因子,为科学评价华北落叶松人工林土壤碳库和土壤碳循环过

程提供依据。

1 试验样地概况

试验地位于山西省太岳山森林经营局的好地方林场,地理位置为 111°59'E—122°01'E,36°44'N—36°47'N,海拔 1749—2431 m,土壤主要是棕壤。该地气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 8.7 °C,昼夜温差大;年降雨量 600 mm,雨量主要集中在 7、8 月,霜冻期为 10 月上旬至翌年 4 月下旬,无霜期 150—180 d。华北落叶松、油松(*Pinus tabulaeformis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)是本区最有代表性树种,也是主要森林植被。灌木主要有忍冬(*Lonicera altamanni*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、杠柳(*Periploca sepium*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)等;草类有蛇莓(*Duchesnea indica*)、黄花蒿(*Herba artemisiae*)、细叶苔草(*Carex rigescens*)、小红菊(*Dendranthema chanetii*)、蓬子菜(*Galium verum*)等。

2 研究方法

2.1 试验样地设置

2012 年在相同坡位、坡向、林相基本一致的华北落叶松人工林设置 12 块 25 m×25 m 标准样地,按照密度梯度分为 4 个密度组,范围从 896 株/hm²到 2160 株/hm²。样地设置原则:依据采伐强度标准确定好采伐株数,等距采伐,保持人工林林相整齐,伐木作业采用人力油锯伐木,并将采伐物全部移出样地。1 号、2 号、3 号样地为对照样地,4 号、5 号、6 号样地为轻度间伐样地,7 号、8 号、9 号样地为中度间伐样地,10 号、11 号、12 号样地为重度间伐样地,各样地具体情况见表 1。

表 1 样地基本特征
Table 1 Characteristics of sampling plots

样地号 Plot code	坡向 Aspect	海拔 Elevation/m	平均树高 Height/m	平均胸径 Diameter at breast height/cm	密度 Stand density/ (株/hm ²)	间伐强度 Density control/%
1	北	2298	12.4	14.5	2160.0	0.00
2	北	2317	16.5	15.6	2112.0	0.00
3	北偏东 8°	2329	17.2	16.1	2032.0	0.00
4	北	2328	12.8	16.5	1936.0	15.00
5	北	2339	13.8	14.5	1904.0	15.00
6	北偏东 8°	2350	15.1	15.8	1712.0	15.00
7	北	2337	16.5	15.6	1504.0	35.00
8	北	2334	17.4	16.3	1376.0	35.00
9	北偏西 10°	2355	16.4	16.0	1328.0	35.00
10	北	2330	13.1	15.7	1248.0	50.00
11	北	2330	16.5	16.4	1184.0	50.00
12	北偏西 10°	2359	17.4	17.9	896.0	50.00

2016 年 4 月初在每块样地比较平缓的位置随机分别设置 9 个 2 m×2 m 的小样方,分为“原状”、“去除凋落物”、“加倍凋落物”3 种处理,每种处理 3 个重复,在样方中心位置放置一个内径 20 cm、高 10 cm 的聚氯乙烯(PVC)土壤环,压入土壤 5 cm 深处。①原状:不做任何凋落物处理作为对照;②去除凋落物:去除小区内地表全部凋落物,在小区上方设置离地 0.5 m 高度 2 m×2 m 的尼龙网阻止凋落物落入;③凋落物加倍:每月测定呼吸前将附近去除凋落物处理设置的尼龙网框内收集的凋落物及时均匀撒入到凋落物加倍处理小区内。采用裂区试验设计将间伐和凋落物处理相结合,共 12 种处理,即对照(CK)、去除凋落物(RL)、加倍凋落物(DL)、轻度间伐(T₁₅)、轻度间伐×去除凋落物(T₁₅RL)、轻度间伐×加倍凋落物(T₁₅DL)、中度间伐(T₃₅)、中度间伐×去除凋落物(T₃₅RL)、中度间伐×加倍凋落物(T₃₅DL)、重度间伐(T₅₀)、重度间伐×去除凋落物(T₅₀RL)、

重度间伐×加倍凋落物(T₅₀DL)。

2.2 土壤呼吸以及温湿度测定

2016年5月至10月的每月月中(15日左右)、月末(30日左右)选取2日晴好天气,于9:00—16:00使用采用2台美国LI-COR公司生产的LI-8100开路式土壤碳通量测量系统测定各样地土壤呼吸速率,同时使用LI-8100配置的土壤温度和水分传感器同步测定土表下5 cm处土壤温湿度,每次测量时间设定为150 s,每个测定点测定3次取平均值,每2 h测定一轮共测定3次,取每种处理当天多次测定的平均值作为该处理平均土壤呼吸速率。使用HOBO TidbiT v2(UTBI-001)温度记录仪(Oneset, USA),将其埋入每块样地土壤下5 cm处,每隔30 min记录1次土壤温度,对整个生长季样地的土壤温度进行连续测定。

2.3 数据分析与处理

土壤呼吸速率与土壤温湿度的关系模型为:

$$R_s = aW + b;$$

$$R_s = a e^{bT};$$

$$R_s = a + bT + cW;$$

$$R_s = a e^{bT} W^c$$

式中, R_s 表示土壤呼吸速率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), T 表示土壤5 cm深处温度($^{\circ}\text{C}$)^[20], W 表示土壤5 cm深处湿度(%), a 、 b 、 c 为待定参数^[21]。

土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10})计算公式为:

$$Q_{10} = e^{10b}$$

式中, b 为公式 $R_s = a e^{bT}$ 中计算得到的常量 b ^[22]。

各处理测定的土壤5 cm深处温度 T_0 与温度记录仪连续测定的土壤5 cm深处温度 T_i 存在显著的线性相关性($T_i = a T_0 + b$, CK: $R^2 = 0.98$; RL: $R^2 = 0.92$; DL: $R^2 = 0.94$; T₁₅: $R^2 = 0.98$; T₁₅RL: $R^2 = 0.95$; T₁₅DL: $R^2 = 0.94$; T₃₅: $R^2 = 0.97$; T₃₅RL: $R^2 = 0.93$; T₃₅DL: $R^2 = 0.94$; T₅₀: $R^2 = 0.96$; T₅₀RL: $R^2 = 0.92$; T₅₀DL: $R^2 = 0.93$; $P < 0.0001$)。将非测定日温度记录仪连续测定的土壤温度代入 $R_s = a e^{bT}$ 关系模型可得非测定日的土壤呼吸速率。

土壤呼吸日通量 R 计算公式为:

$$R = R_i \times 3600 \times 24 \times (12/10^6)$$

式中, R 为土壤呼吸日通量(g C/m^2), R_i 为土壤呼吸平均速率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)^[15]。

所有数据运用SPSS 19.0软件进行分析,采用重复测量方差(repeated-measures ANOVA)检验华北落叶松人工林间伐样地不同凋落物处理之间土壤呼吸速率与土壤温湿度的差异性,线性回归分析土壤呼吸速率与土壤温湿度的关系,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)分析间伐样地不同凋落物处理下平均碳排放通量的差异。

3 结果与分析

3.1 土壤温湿度变化

不同处理土壤温度均呈现显著性的季节变化($P < 0.05$),但不同处理间均无显著差异。T₃₅、T₃₅DL土壤温度最高值分别为14.77 $^{\circ}\text{C}$ 、14.51 $^{\circ}\text{C}$,均出现在8月下旬;而其他处理的土壤温度均在8月中旬达到最高值(图1)。

不同处理土壤湿度均出现显著的季节变化,均在6、7月份达到最高值。间伐和凋落物处理均高于CK。T₅₀RL的土壤湿度比CK增加了49.93%,增幅最大(表2)。总体来看,在同一间伐处理下,去除凋落物处理土壤湿度增幅较大;在同一凋落物处理下,重度间伐处理土壤湿度增幅较大。

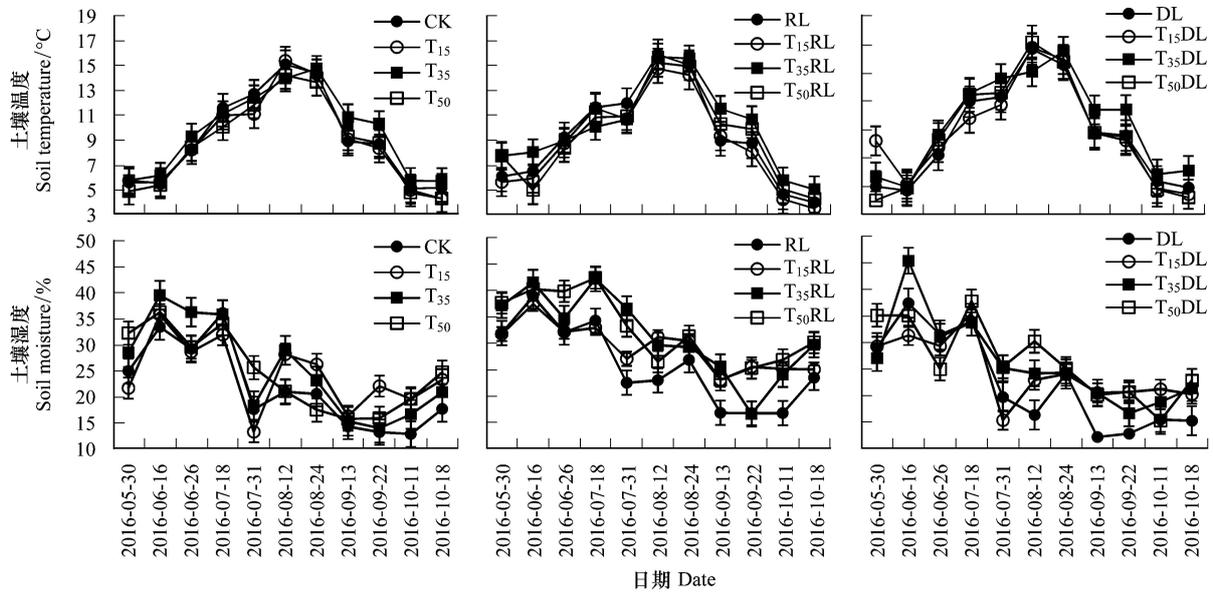


图 1 不同处理土壤温湿度动态变化(平均值±标准误差)

Fig.1 Dynamics of soil temperature and moisture under different treatments(mean±SE)

CK:对照,control;T₁₅:轻度间伐,Low thinning;T₃₅:中度间伐,Moderate thinning;T₅₀:重度间伐,Heavy thinning;RL:去除凋落物,Exclusion litterfall;DL:加倍凋落物,Addition litterfall;T₁₅RL:轻度间伐×去除凋落物,Low thinning × exclusion litterfall;T₃₅RL:中度间伐×去除凋落物,Moderate thinning × exclusion litterfall;T₅₀RL:重度间伐×去除凋落物,Heavy thinning × exclusion litterfall;T₁₅DL:轻度间伐×加倍凋落物,Low thinning × addition litterfall;T₃₅DL:中度间伐×加倍凋落物,Moderate thinning × addition litterfall;T₅₀DL:重度间伐×加倍凋落物,Heavy thinning × addition litterfall

表 2 不同处理土壤温湿度的平均值(平均值±标准误差)

Table 2 Mean values of soil temperature and moisture under different treatments(mean±SE)

处理 Treatment	土壤温度 Soil temperature/°C	土壤湿度 Soil moisture/%	土壤呼吸速率 Soil respiration rate/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
对照 Control	8.97±0.48a	21.35±1.10a	2.49±0.14a
轻度间伐 Low thinning	8.73±0.39a	24.63±0.96b	2.36±0.19a
中度间伐 Moderate thinning	9.33±0.38a	25.05±1.19b	2.88±0.14b
重度间伐 Heavy thinning	8.41±0.38a	24.38±1.20b	2.41±0.11a
去除凋落物 Exclusion litterfall	9.15±0.50a	25.41±1.23b	1.49±0.08c
加倍凋落物 Addition litterfall	8.45±0.46a	22.09±1.26a	2.89±0.16b
轻度间伐×去除凋落物 Low thinning × exclusion litterfall	8.61±0.40a	29.23±0.90c	1.49±0.09c
中度间伐×去除凋落物 Moderate thinning × exclusion litterfall	9.93±0.42a	30.38±1.07c	1.83±0.10d
重度间伐×去除凋落物 Heavy thinning × exclusion litterfall	9.16±0.41a	32.01±1.03c	1.42±0.08c
轻度间伐×加倍凋落物 Low thinning × addition litterfall	8.65±0.41a	24.76±0.95b	2.80±0.14b
中度间伐×加倍凋落物 Moderate thinning × addition litterfall	9.03±0.38a	25.81±1.21b	3.85±0.15e
重度间伐×加倍凋落物 Heavy thinning × addition litterfall	8.35±0.42a	26.37±1.05b	2.82±0.11b

同一列不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$), $n = 9$

3.2 土壤呼吸速率变化

不同处理土壤呼吸速率均呈现明显的季节动态,最高值均出现在 8 月下旬(图 2)。整个生长季期间,T₁₅、T₅₀的平均土壤呼吸速率均低于 CK,但未达到显著差异;T₃₅比 CK 增加了 15.66%。RL 的平均土壤呼吸速率比 CK 降低了 40.16%;DL 比 CK 增加了 16.06%(表 2)。交互处理下,T₁₅RL、T₃₅RL、T₅₀RL 的平均土壤呼吸速率分别比 CK 降低了 40.16%、26.51%、42.97%,T₅₀RL 对土壤呼吸的抑制作用最强;而 T₁₅DL、T₃₅DL、T₅₀DL

分别比 CK 增加了 12.45%、54.62%、13.25% ($P < 0.05$), T_{35} DL 对土壤呼吸的促进作用最强。

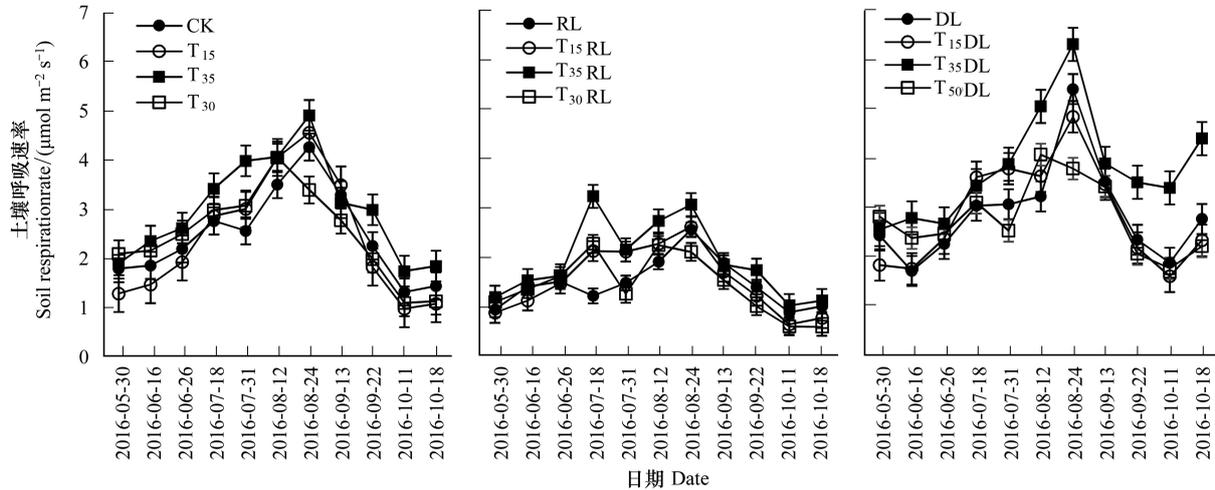


图 2 不同处理土壤呼吸速率的季节动态(平均值±标准误差)

Fig.2 Seasonal dynamics of soil respiration under different treatments (mean±SE)

3.3 土壤呼吸速率与土壤温湿度的关系

不同处理土壤呼吸速率与土壤温度均呈显著指数相关 ($P < 0.01$), 与土壤湿度无显著线性关系 (表 3), 土壤温度解释了土壤呼吸季节变化的 26.2%—56.5%。土壤呼吸温度敏感性指数 (Q_{10}) 最大值为 T_{15} , 最小值为 T_{50} DL。 T_{15} 、 T_{35} 、 T_{50} 的 Q_{10} 值均大于 CK, RL、DL 的 Q_{10} 值小于 CK, 表明间伐增大了温度敏感性, 而凋落物处理降低了温度敏感性。 T_{15} RL、 T_{50} RL 的 Q_{10} 值大于 CK, T_{35} RL、 T_{15} DL、 T_{50} DL 均小于 CK, 同时交互处理均小于仅间伐时的温度敏感性, 表明间伐和凋落物处理在温度敏感性上表现出拮抗作用。

表 3 土壤呼吸与土壤温度的回归模型以及温度敏感性指数 (Q_{10})

Table 3 Regression model of soil respiration with soil temperature and temperature sensitivity index (Q_{10})

处理 Treatment	$R_s = a e^{bT}$			$R_s = aW + b$			温度敏感性指数 Temperature sensitivity index (Q_{10})
	a	b	R^2	a	b	R^2	
对照 Control	1.04	0.09	0.53**	-0.01	2.36	0.03	2.36
轻度间伐 Low thinning	0.65	0.12	0.56**	0.04	1.11	0.06	3.46
中度间伐 Moderate thinning	1.14	0.09	0.50**	-0.01	2.90	0.01	2.44
重度间伐 Heavy thinning	0.94	0.10	0.53**	-0.03	2.89	0.05	2.72
去除凋落物 Exclusion litterfall	0.75	0.07	0.44**	-0.01	1.76	0.04	1.95
加倍凋落物 Addition litterfall	1.58	0.06	0.31**	-0.02	3.37	0.04	1.86
轻度间伐×去除凋落物 Low thinning × exclusion litterfall	0.51	0.11	0.57**	0.04	0.21	0.16	2.95
中度间伐×去除凋落物 Moderate thinning × exclusion litterfall	0.78	0.08	0.40**	-0.02	2.17	0.03	2.12
重度间伐×去除凋落物 Heavy thinning × exclusion litterfall	0.54	0.09	0.46**	0.01	1.25	0.01	2.54
轻度间伐×加倍凋落物 Low thinning × addition litterfall	1.32	0.08	0.40**	-0.03	3.42	0.02	2.12
中度间伐×加倍凋落物 Moderate thinning × addition litterfall	2.27	0.05	0.27**	-0.04	4.68	0.06	1.68
重度间伐×加倍凋落物 Heavy thinning × addition litterfall	1.70	0.05	0.26**	0.03	1.93	0.08	1.67

* *, 在 0.01 水平上差异显著; R_s : 土壤呼吸速率, soil respiration rate; T : 土壤 5 cm 深处温度, soil temperature at a depth of 5 cm; W : 土壤 5 cm 深处湿度, soil moisture at a depth of 5 cm

采用线性和非线性的温湿度双因素模型进行分析,结果表明非线性模型能够更好的解释土壤呼吸速率与土壤温湿度的关系(表4),土壤温湿度能够共同解释土壤呼吸季节变化的28.7%—62.3%,表明在一定程度上复合模型预测土壤呼吸的准确性更高。

表4 土壤呼吸与土壤温湿度的双因素模型

Table 4 Two-factor regression models of soil respiration with soil temperature and moisture

处理 Treatment	$R_s = a + bT + cW$				$R_s = a e^{bT} W^c$			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R^2	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R^2
对照 Control	0.37	0.21	0.01	0.50**	0.73	0.09	0.12	0.54**
轻度间伐 Low thinning	-0.62	0.29	0.02	0.39**	0.48	0.12	0.10	0.56**
中度间伐 Moderate thinning	0.40	0.27	0.01	0.51**	1.18	0.09	-0.01	0.50**
重度间伐 Heavy thinning	0.40	0.23	0.01	0.59**	0.88	0.10	0.02	0.53**
去除凋落物 Exclusion litterfall	0.65	0.10	-0.01	0.47**	0.84	0.07	-0.03	0.44**
加倍凋落物 Addition litterfall	1.68	0.18	-0.13	0.29**	2.02	0.06	-0.08	0.32**
轻度间伐×去除凋落物 Low thinning × exclusion litterfall	-0.52	0.15	0.03	0.57**	0.14	0.11	0.39	0.62**
中度间伐×去除凋落物 Moderate thinning × exclusion litterfall	0.48	0.14	-0.01	0.37**	1.02	0.08	-0.08	0.41**
重度间伐×去除凋落物 Heavy thinning × exclusion litterfall	-0.30	0.13	0.02	0.47**	0.34	0.10	0.13	0.48**
轻度间伐×加倍凋落物 Low thinning × addition litterfall	1.24	0.21	-0.01	0.38**	1.36	0.08	-0.01	0.41**
中度间伐×加倍凋落物 Moderate thinning × addition litterfall	2.09	0.21	-0.01	0.28**	2.86	0.05	-0.07	0.28**
重度间伐×加倍凋落物 Heavy thinning × addition litterfall	0.32	0.14	0.01	0.28**	1.06	0.05	0.15	0.29**

** ,在 0.01 水平上差异显著

3.4 生长季土壤呼吸通量

如表5所示,CK、 T_{15} 、 T_{35} 、 T_{50} 土壤呼吸生长季通量分别为416.14、396.78、471.20、421.27 g C/m²,表明 T_{35} 使土壤呼吸生长季通量显著增长13.23%, T_{50} 使土壤呼吸通量增加, T_{15} 使土壤呼吸通量减少,但未达到显著差异;RL、DL分别为262.66、496.01 g C/m²,RL使土壤呼吸通量减少36.88%;DL使土壤呼吸生长季通量增长19.19%。交互处理下, T_{15} RL、 T_{35} RL、 T_{50} RL、 T_{15} DL、 T_{35} DL、 T_{50} DL土壤呼吸生长季通量分别为277.19、343.69、258.21、492.69、655.61、480.01 g C/m²,表明 T_{50} RL使土壤呼吸生长季通量减少了157.93 g C/m²,降幅最大; T_{35} DL增大了239.47 g C/m²,增幅最大。

表5 不同处理逐月累计土壤呼吸

Table 5 Cumulative CO₂ fluxes under different treatments

处理 Treatment	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October
CK	39.33±14.61a	95.55±12.02a	187.76±16.36a	291.80±16.93a	362.28±21.39a	416.14±20.41a
T_{15}	27.10±3.66b	81.85±6.14c	174.73±10.63a	284.90±23.13a	353.73±47.78a	396.78±50.48a
T_{35}	42.69±5.24c	104.27±14.67a	207.81±13.71a	325.54±20.36d	407.92±24.67d	471.20±26.38d
T_{50}	37.41±7.12a	94.91±13.20a	190.33±13.63a	298.39±15.13a	368.54±19.65a	421.27±21.29a
RL	24.83±3.28b	70.35±7.97b	112.43±11.25b	181.97±12.28b	233.14±11.49b	262.66±12.49b
DL	38.18±20.96a	100.60±22.65a	196.24±27.73a	331.13±35.47d	423.07±42.35d	496.01±41.15d
T_{15} RL	26.82±1.18b	67.32±3.15b	133.32±10.15b	209.45±13.50b	255.14±14.65b	277.19±16.53b
T_{35} RL	30.95±5.49b	80.11±10.05c	163.96±17.73a	254.25±28.35c	310.17±31.39c	343.69±32.61c
T_{50} RL	30.53±4.80b	76.93±8.48c	131.96±15.30b	199.80±16.88b	239.56±19.64b	258.21±19.53b
T_{15} DL	28.86±3.28b	93.81±8.65a	209.66±18.04a	342.22±23.89d	430.81±26.31d	492.69±27.02d
T_{35} DL	40.09±2.42a	125.66±7.24d	240.27±10.75c	417.75±13.76e	533.65±14.33e	655.61±15.18e
T_{50} DL	44.13±12.69c	120.32±21.01d	208.53±23.84a	331.54±26.73d	417.48±37.02d	480.01±40.96d

同一列不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$), $n = 9$

3.5 间伐和凋落物处理对土壤呼吸的交互作用

间伐和凋落物处理存在交互作用,使土壤呼吸产生显著差异($P < 0.001$) (表 6)。不同月份不同强度间伐林分凋落物处理对土壤呼吸的影响不是成比例或者等同的(图 3)。总体来看,轻度间伐和重度间伐降低了土壤呼吸速率,中度间伐增大了土壤呼吸速率。去除凋落物增大了轻度间伐和重度间伐之后土壤呼吸速率的变化幅度,加倍凋落物增大了中度间伐之后土壤呼吸的变化幅度。

表 6 不同处理对土壤呼吸的三因素方差分析

Table 6 Results of a repeated measurements ANOVA showing the effects of different treatments on soil respiration

因子 Factor	F	P	因子 Factor	F	P
月份 Mouth	52.71	< 0.001	凋落物处理×月份 Litter treatment × mouth	2.51	0.032
间伐 Thinning	4.84	0.003	间伐×凋落物处理 Thinning × Litter treatment	25.93	< 0.001
凋落物处理 Litter treatment	35.48	< 0.001	间伐×凋落物处理×月份 Thinning, Litter treatment × mouth	3.23	0.016
间伐×月份 Thinning × mouth	1.37	0.192			

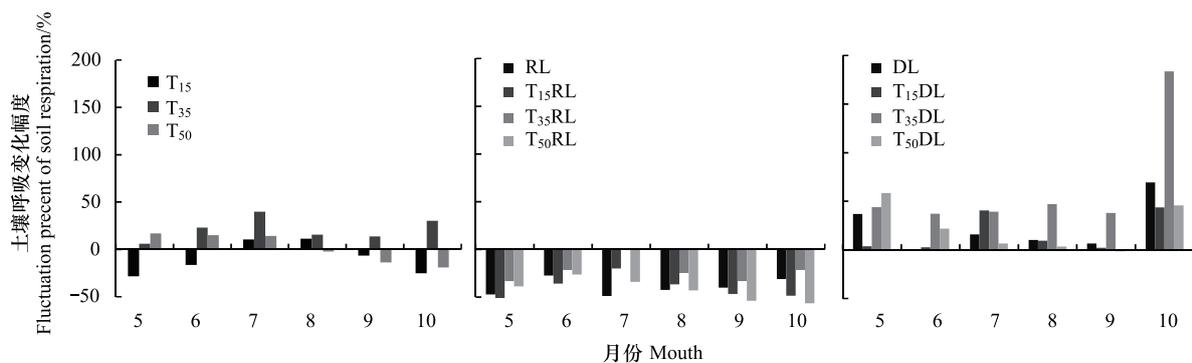


图 3 不同处理土壤呼吸速率的变化幅度

Fig.3 Fluctuation of soil respiration rate under different treatments

4 讨论

4.1 间伐和凋落物处理对土壤呼吸的影响

森林的间伐作业减少了树木,对森林造成了强烈干扰,可能对土壤的物理和化学性质产生极大的影响^[23]。因森林类型、更新速度和气候条件等的不同,间伐会产生促进土壤呼吸^[24]、抑制土壤呼吸^[25]和没有影响^[26-28]三种不同结果。本研究结果表明适度的间伐能够促进土壤呼吸,随着间伐强度的增强,土壤呼吸速率先降低再显著升高然后再降低。中度间伐时土壤呼吸速率达到最高,显著大于轻度间伐和重度间伐,可能是由于土壤湿度增加后促进了土壤微生物活性,从而使土壤呼吸速率增强。随着间伐强度进一步增强,地下根系和凋落物的大量减少则对土壤呼吸起到了一定的抑制作用。

凋落物作为土壤碳库碳输入的重要来源以及土壤呼吸的重要组成部分,改变凋落物输入就能影响到土壤呼吸^[29]。去除凋落物直接干扰了有机碳的输入,同时也去除了生长在凋落物上的微生物,可能对土壤微生物群落结构产生影响,进而降低土壤呼吸速率^[30]。本研究结果表明去除凋落物使土壤呼吸显著降低 40.16%,加倍凋落物则使土壤呼吸显著提高 16.06%,去除凋落物对土壤呼吸降低幅度远大于加倍凋落物土壤呼吸的增加幅度,表明去除凋落物和加倍凋落物对土壤呼吸的影响并不是成比例的,原因可能是由于加倍凋落物增加了土壤微生物的可利用碳源,促进了土壤微生物的生长和繁殖,从而进一步加强土壤微生物对土壤有机质的分解,提高了土壤呼吸速率。这与 Yan 等^[31]对樟树和马尾松混交林的研究结论相一致,但高于李化山等^[32]对油松林的研究结果,这种情况可能与不同的森林类型、立地条件和气候条件有关。

4.2 间伐和凋落物处理对土壤呼吸的交互作用

作为对根和微生物呼吸的底物供应产生影响的主要方式,间伐和凋落物处理的交互作用对土壤呼吸存在着复杂的影响。间伐能够影响光照、地下死根量、凋落物量、土壤温湿度等影响因子,凋落物则对土壤表面碳源、微生物以及土壤温湿度产生影响,本研究表明轻度间伐和重度间伐促进了去除凋落物后土壤呼吸速率的降低幅度,抑制了加倍凋落物后土壤呼吸速率的升高幅度,轻度间伐、重度间伐与去除凋落物处理形成协同作用,与加倍凋落物处理形成拮抗作用;而中度间伐与去除凋落物处理形成拮抗作用,与加倍凋落物处理形成协同作用。研究发现 T_{15} 在整个生长季是对土壤呼吸起抑制作用的,而在 7、8 月份雨季期间对土壤呼吸起促进作用,此时 $T_{15}RL$ 对土壤呼吸速率的降低幅度小于 RL ,可能是由于雨季期间土壤温湿度达到最佳,土壤微生物呼吸的增加抵消了部分根系和凋落物呼吸的损失。 $T_{50}RL$ 在 5、6、7 月份对土壤呼吸速率的降低幅度小于 RL ;而在 8、9、10 月份对土壤呼吸速率的降低幅度大于 RL ,且随着时间的推移促进作用逐渐增强,可能是由于前期较大的土壤湿度对土壤微生物呼吸起到促进作用,随着土壤湿度的逐渐降低,凋落物呼吸、微生物呼吸的降低以及根系的减少共同使土壤呼吸大幅降低^[24]。Nadelhoffer 研究表明凋落物加倍所引起的土壤呼吸增加程度远大于去除凋落物所引起的土壤呼吸降低程度^[33],向土壤中添加简单和复杂的有机基质会引起土壤中原有有机质的短期变化,这种现象称为“激发效应”^[34]。而本研究结果表明, RL 、 $T_{15}RL$ 、 $T_{50}RL$ 土壤呼吸速率的降低程度分别远大于 DL 、 $T_{15}DL$ 、 $T_{50}DL$ 土壤呼吸速率的增加程度,表明加倍凋落物引起了负激发效应,这与汪金松等对油松人工林土壤呼吸的研究结果相一致;而 $T_{35}DL$ 所引起的土壤呼吸速率增加程度(54.62%)相当于 $T_{35}RL$ 所引起的土壤呼吸速率降低程度(26.51%)的两倍,表明中度间伐林分凋落物加倍的交互作用引起了正激发效应,这与王光军对杉木人工林土壤呼吸的研究结果相一致,这种情况表明土壤呼吸激发效应可能与森林类型、林分密度都具有一定关系。间伐和凋落物处理的交互作用包含了许多土壤物理生物化学过程,受根系、微生物等其他因素的影响,产生的效应是综合各种因素的共同结果,有待进一步深入研究。

4.3 土壤水热因子对土壤呼吸的影响

温度和光照以及其他协同因子影响着土壤底物供应,同时温度影响着枝条和根生长的物候学特征,因而对土壤呼吸起部分决定作用^[35-36]。本研究中,不同处理之间土壤温度不存在显著差异,表明间伐和凋落物处理对土壤温度的影响较弱。土壤呼吸速率与土壤温度都呈显著指数关系,间伐和凋落物处理并没有改变土壤呼吸速率与土壤温度的正相关性。间伐后土壤温度表现为 $T_{35} > CK > T_{50} > T_{15}$,由于土壤呼吸和温度呈指数正相关关系,土壤温度的增加就会引起土壤呼吸的增加,这与实际结果基本相一致,说明间伐后土壤温度的变化在土壤呼吸的变化中起到了一定的作用;凋落物处理下土壤温度表现为 $RL > CK > DL$,而土壤呼吸实际结果表现为 $RL < CK < DL$,这说明改变凋落物输入后土壤温度的变化在土壤呼吸的变化中所起的作用很小。

土壤温度敏感性系数(Q_{10})依地理位置和生态系统类型的不同相差很大^[37],受到土壤生物、底物质量等多种因素调整,且随着土壤温湿度变化而变化^[38]。本研究表明凋落物处理能够降低土壤温度敏感性,这与李晓杰、吴鹏^[39]等人研究结论一致,而与汪金松、高强^[40]等人研究结论相反,这可能与测定方法、气候以及林分类型等诸多因素有关。另一方面,本研究结果表明间伐能够较大幅度提高温度敏感性,随着间伐强度的增强, Q_{10} 值出现先升高再降低然后再升高的现象, T_{15} 处理使 Q_{10} 值升高 46.25%,此时 Q_{10} 值最高,表明适度的间伐可以增强对外界环境变化的抵御能力。

在降雨量较少时土壤湿度主要是通过影响微生物间接影响土壤呼吸,水分胁迫对微生物生长的影响随着生物合成、能量产生、底物吸收的速率以及水分干扰的性质和方式不同而变化^[41];在水量充足时则通过影响底物和氧气的扩散来调整土壤呼吸。本研究结果表明土壤湿度与土壤呼吸的相关性较弱,土壤湿度随间伐强度的增加而增加,去除凋落物土壤湿度的增加幅度大于加倍凋落物土壤湿度的增加幅度。间伐使土壤湿度增加的原因可能是由于采伐降低了森林的树冠截留量,增大了林内穿透雨量。去除凋落物土壤湿度大于对照,这与前人研究结果不一致,原因可能是凋落物层去除后促进了降雨的直接输入,而局部小环境的蒸散作用较低。土壤湿度的变化往往伴随着土壤温度、根和微生物活性的变化,土壤呼吸与土壤湿度的关系常与其他环

境因子混杂在一起,导致土壤湿度对土壤呼吸的影响较为复杂,因此间伐和改变凋落物处理后土壤湿度的变化可能在土壤呼吸的变化中起着重要的作用。土壤温度与土壤呼吸的单因素模型能够解释土壤呼吸变化的26.2%—56.5%,而采用土壤呼吸与土壤温湿度的非线性复合模型则可以共同解释土壤呼吸变化的28.7%—62.3%,结果表明非线性复合模型能够达到更好地拟合效果,但提升效果不明显,说明在本试验中土壤湿度并不是土壤呼吸的主要控制因子。

5 结论

在人工林经营过程中,轻度间伐在一定程度上降低人工林土壤碳排放,而中度间伐则短期内会对土壤碳排放起到促进作用。间伐后凋落物的增多对土壤碳排放起到一定的激发效应,中等强度间伐后凋落物的增多能够最大程度激发促进土壤碳排放。由于本试验只有一个生长季的试验数据,对于更深入的阐明间伐和改变凋落物输入对土壤呼吸的影响具有一定的局限性。同时在以后的试验中需要加入对土壤微生物等其他环境因子的研究,通过长期监测以期进一步理解森林生态系统碳循环过程影响机制。

参考文献 (References):

- [1] Crow S E, Lajtha K, Bowden R D, Yano Y, Brant J B, Caldwell B A, Sulzman E W. Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(10): 2224-2232.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [3] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine. *Tree Physiology*, 2003, 23(4): 273-280.
- [4] Schlesinger W H, Lichter J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature*, 2001, 411(6836): 466-469.
- [5] Startsev N A, McNabb D H, Startsev A D. Soil biological activity in recent clearcuts in west-central Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, 78(1): 69-76.
- [6] 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.
- [7] 刘保新, 汪金松, 康峰峰, 尚宝山, 赵秀海. 太岳山油松人工林土壤呼吸对抚育强度的响应. *应用与环境生物学报*, 2012, 18(1): 17-22.
- [8] Sulzman E W, Brant J B, Bowden R D, Lajtha K. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO₂ efflux in an old growth coniferous forest. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 231-256.
- [9] Leff J W, Wieder W R, Taylor P G, Townsend A R, Nemergut D R, Grandy A S, Cleveland C C. Experimental litterfall manipulation drives large and rapid changes in soil carbon cycling in a wet tropical forest. *Global Change Biology*, 2012, 18(9): 2969-2979.
- [10] Wang Q K, He T X, Wang S L, Liu L. Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178-179: 152-160.
- [11] Sheng H, Yang Y S, Yang Z J, Chen G S, Xie J S, Guo J F, Zou S Q. The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China. *Global Change Biology*, 2010, 16(3): 1107-1121.
- [12] 王光军, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 李树战. 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. *生态学报*, 2009, 29(2): 643-652.
- [13] Wang Y F, Hao Y B, Cui X Y, Zhao H T, Xu C Y, Zhou X Q, Xu Z H. Responses of soil respiration and its components to drought stress. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(1): 99-109.
- [14] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396(6711): 570-572.
- [15] 周小刚, 郭胜利, 车升国, 张芳, 邹俊亮, 张彦军, 南雅芳, 李泽, 蒲辉. 黄土高原刺槐人工林地凋落物对土壤呼吸的贡献. *生态学报*, 2012, 32(7): 2150-2157.
- [16] 解欢欢, 马文瑛, 赵传燕, 高云飞, 王清涛, 葛红元, 林梅, 黄晖云. 苔藓和凋落物对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2017, 37(5): 1379-1390.
- [17] 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 康峰峰, 尚宝山, 池青俊. 改变C源输入对油松人工林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2012, 32(9): 2768-2777.
- [18] 李晓杰, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 林廷武, 施友文, 谢锦升, 杨玉盛. 中亚热带杉木人工林和米楮次生林凋落物添加与去除对土壤呼吸

- 的影响. 植物生态学报, 2016, 40(5): 447-457.
- [19] 李国雷, 刘勇, 吕瑞恒, 于海群, 李瑞生. 华北落叶松人工林密度调控对林下植被发育的作用过程. 北京林业大学学报, 2009, 31(1): 19-24.
- [20] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413(6856): 622-625.
- [21] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 宋文质, 刘文兆, 李双江, 朱元骏, 庞军柱, 欧阳志云. 干湿交替格局下黄土高原小麦田土壤呼吸的温湿度模型. 生态学报, 2009, 29(6): 3028-3035.
- [22] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada Forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(3): 687-696.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Vesala T, Suni T, Rannik Ü, Keronen P, Markkanen T, Sevanto S, Grönholm T, Smolander S, Kulmala M, Ilvesniemi H, Ojansuu R, Uotila A, Levula J, Mäkelä A, Pumpanen J, Kolari P, Kulmala L, Altimir N, Berninger F, Nikinmaa E, Hari P. Effect of thinning on surface fluxes in a boreal forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): GB2001.
- [27] Brehm G, Colwell R K, Kluge J. The role of environment and mid-domain effect on moth species richness along a tropical elevational gradient. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(2): 205-219.
- [28] Edmonds R L, Marra J L, Barg A K, Sparks G B. Influence of Forest Harvesting on Soil Organisms and Decomposition in Western Washington. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-178, 2000.
- [29] Chen D M, Zhou L X, Wu J P, Hsu J, Lin Y B, Fu S L. Tree girdling affects the soil microbial community by modifying resource availability in two subtropical plantations. *Applied Soil Ecology*, 2012, 53: 108-115.
- [30] Li Y Q, Xu M, Sun O J, Cui W C. Effects of root and litter exclusion on soil CO_2 efflux and microbial biomass in wet tropical forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(12): 2111-2114.
- [31] Yan W D, Chen X Y, Tian D L, Peng Y Y, Wang G J, Zheng W. Impacts of changed litter inputs on soil CO_2 efflux in three forest types in central south China. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(7): 750-757.
- [32] 李化山, 汪金松, 赵秀海, 康峰峰, 张春雨, 刘星, 王娜, 赵博. 模拟氮沉降下去除凋落物对太岳山油松林土壤呼吸的影响. 生态学杂志, 2014, 33(4): 857-866.
- [33] Nadelhoffer K J. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 131-139.
- [34] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(14): 1915-1925.
- [35] 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.
- [36] Dunne J, Harte J, Taylor K J. Subalpine meadow flowering phenology responses to climate change: integrating experimental and gradient methods. *Ecological Monographs*, 2003, 73(1): 69-86.
- [37] 韩璐, 陈辉, 陈同同, 付阳阳, 李阳. 柴达木盆地土壤温湿度变化特征及相关关系分析. 水土保持研究, 2016, 23(6): 166-173.
- [38] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 王劲松, 刘丽香, 迟永刚, 郑云普. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [39] 吴鹏, 崔迎春, 赵文君, 舒德远, 杨文斌, 丁访军. 改变凋落物输入对喀斯特森林主要演替群落土壤呼吸的影响. 北京林业大学学报, 2015, 37(9): 17-27.
- [40] 高强, 马明睿, 韩华, 张维砚, 王昊彬, 郑泽梅, 由文辉. 去除和添加凋落物对木荷林土壤呼吸的短期影响. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1189-1197.
- [41] 曲桂芳, 徐文华, 王会, 彭勃, 高德才, 孙建飞, 郑俊强, 姜萍, 白娥. 五角槭根系的负激发效应降低了异养呼吸及其温度敏感性. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2692-2698.