

去除和添加凋落物对马尾松×红锥混交林土壤呼吸的影响^{*}

覃志伟¹, 周晓果¹, 温远光^{1,2**}, 朱宏光^{1,2}, 李海燕¹, 阮友维¹, 蔡道雄^{2,3}, 贾宏炎^{2,3}, 黄雪蔓^{1,2}, 尤业明^{1,2}

(1. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 广西友谊关森林生态系统定位观测研究站, 广西凭祥 532600; 3. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600)

摘要:为探讨凋落物输入量改变对马尾松×红锥混交林碳排放的影响,以马尾松×红锥异龄混交林为研究对象,通过添加和去除凋落物人为地改变碳输入,研究凋落物处理方式对土壤呼吸的影响。结果表明:(1)去除凋落物可降低土壤湿度、提高土壤温度,而添加凋落物则提高土壤湿度、降低土壤温度。去除凋落物使土壤年均呼吸速率显著降低 27.88%,而添加凋落物则使土壤年均呼吸速率显著增加 34.02%。(2)去除凋落物能降低四季的土壤呼吸累积排放量,而添加凋落物则提高四季的土壤呼吸累积排放量。对照、去除和添加凋落物的土壤呼吸的年累积排放量(以 C 计)分别为 $(9.51 \pm 0.12) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $(6.88 \pm 0.21) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $(12.70 \pm 0.53) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,可见去除凋落物使土壤呼吸年累积排放量降低 27.66%,而添加凋落物使土壤呼吸年累积排放量提高 33.54%。(3)不同凋落物处理方式下土壤呼吸速率与土壤温度均呈显著相关,土壤温度解释了土壤呼吸速率变异程度的 74.26%~94.28%。去除凋落物增加了土壤呼吸温度敏感性系数 Q_{10} 值,而添加凋落物则降低 Q_{10} 值。凋落物处理方式对马尾松×红锥异龄混交林土壤呼吸产生了显著影响,证明凋落物对于改变森林生态系统土壤呼吸和碳循环具有重要作用。

关键词:马尾松×红锥混交林 凋落物 土壤呼吸 土壤温度

中图分类号:S718.5 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2019)02-0199-08

0 引言

森林生态系统是陆地生态系统中最大的碳库,其植被碳库占全球植被碳库的 86%以上,土壤碳库约占全球土壤碳库的 73%^[1-2],是全球碳循环和碳平衡的重要组成部分。森林生态系统一方面能通过植被

的光合作用将大气中的 CO_2 固定在森林植被与土壤中,另一方面通过土壤呼吸又将土壤中的碳以 CO_2 的形式转化到大气中^[3]。可见,森林生态系统在调节全球碳平衡以及应对气候变化中发挥着十分重要的作用,森林生态系统碳库的微小变化可能会引起全球气候系统的巨大变化^[4]。因此,研究估算森林生态系

^{*} 国家自然科学基金项目(31860171,31560201),广西重点研发计划项目(2018AB40007),广西自然科学基金项目(2016GXNSFBA380222,2017GXNSFAA198114),广西高等学校重大科研项目(201201ZD001),广西森林生态与保育重点实验室开放课题(QZKFKT2017-01)和广西林业厅科研项目(桂林科字[2009]第八号)资助。

【作者简介】

覃志伟(1992—),男,硕士研究生,主要从事森林生态学研究。

【** 通讯作者】

温远光(1957—),男,博士生导师,教授,主要从事森林生态和森林培育学研究,E-mail:wenyg@263.net。

【引用文本】

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20190506.006

覃志伟,周晓果,温远光,等. 去除和添加凋落物对马尾松×红锥混交林土壤呼吸的影响[J]. 广西科学,2019,26(2):199-206.

QIN Z W, ZHOU X G, WEN Y G, et al. Effects of litter removal and addition on soil respiration in a *Pinus massoniana* × *Castanopsis hystrix* mixed plantation [J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(2): 199-206.

统土壤碳库的排放量对于现在及未来的气候变化和生态系统碳平衡都有着重要的意义。

土壤呼吸是森林生态系统碳循环过程的关键环节,亦是森林生态系统的碳素向大气输出的主要途径,是森林生态系统能量流动和物质循环的重要生态过程^[5]。凋落物是土壤呼吸的重要碳源,其输入方式及质和量的变化会对土壤呼吸产生重要影响^[6]。目前国内有关控制碳输入对土壤呼吸的影响方面的研究工作不少,但是主要集中在天然林或人工纯林^[7-10],对我国亚热带森林类型特别是过熟林土壤呼吸方面的研究仍然比较缺乏,需要进一步深入研究。马尾松(*Pinus massoniana*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)是我国亚热带地区的主要乡土造林树种,在我国森林资源中占有十分重要的地位。本研究以马尾松×红锥异龄混交林为对象,通过添加和去除地面凋落物人为地改变碳输入,研究凋落物处理对土壤呼吸的影响。通过对不同凋落物处理方式下土壤呼吸速率的月动态和季节变化、土壤呼吸年碳排放量的估算,探讨凋落物处理方式对人工林碳排放的影响,以期为我国人工林碳库的精确估算及生态系统碳储量的研究提供基础资料,同时为深入研究马尾松针阔异龄混交林碳循环特征提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区凭祥市(106°41′~106°59′E, 21°57′~22°16′N),属于亚热带湿润-半湿润季风气候区,年平均气温维持在19.5~21.4℃,干湿季节明显,4—9月为雨季,10月至翌年3月为旱季。土壤类型为砖红壤,土质较疏松,黏性适中,土层厚度在100 mm以上。植被发育良好,植物群落类型繁多,境内的原生植被大多被毁或被人为改造,现存的是大面积人工林,主要乔木有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松、红锥、米老排(*Mytilaria laosensis*)、火力楠(*Michelia macclurei*)、西南桦(*Betula alnoides*)、格木(*Erythrophleum fordii*)和桉树(*Eucalyptus* spp.)等;林下灌木藤本植物主要有九节(*Psychotria rubra*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、余甘子(*Phyllanthus emblica*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、三桠苦(*Evodia lepta*)、光叶槭(*Acer laevigatum*)、钩吻(*Gelsemium elegans*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)和菝葜(*Smilax china*)等;林下草本植物主要有蔓生莠竹(*Microstegium nodosum*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、铁芒箕(*Dicranopteris dichotoma*)、凤尾蕨(*Pteris cretica*)、半

边旗(*Pteris semipinnata*)、高良姜(*Alpinia officinarum*)、黄茅草(*Narenga fallax*)、小花露籽草(*Ottolochloa nodosa*)和山菅兰(*Dianella ensifolia*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

本研究在中国林科院热带林业实验中心伏波实验场进行。实验选取马尾松×红锥异龄混交林为研究对象,该混交林是1983年在27 a生的马尾松纯林中套种红锥,经过多次抚育间伐,形成了保留林木密度为800~1 000株/hm²的异龄混交林,其中马尾松与红锥的保留密度为2:3。2017年8月,马尾松平均树高29.36 m,平均胸径25.36 cm;红锥平均树高20.9 m,平均胸径18.9 cm。

2017年8月,在马尾松×红锥异龄混交林的地表凋落物层、树木长势相对一致的区域设置3个组:对照组(CK)、去除凋落物处理组(Litter removal, LR)和添加凋落物处理组(Litter addition, LA)。CK、LR、LA处理组均设置5个重复小样方,小样方大小为2 m×2 m,小样方间相距5 m以上。每个小样方内各设置1个直径19.6 cm、高9 cm、出露地面2 cm的土壤呼吸环。对照组在整个观测期不做任何处理,保持自然状态。去除凋落物处理组:第1次处理时,清除小样方的地表凋落物,放置土壤呼吸环,并在该处理样方距地面高0.5 m处放置凋落物收集框,收集凋落物并防止凋落物进入样方。添加凋落物处理组:第1次处理时,将LR样方清理的地表凋落物均匀添加到对应的LA样方中,放置土壤呼吸环。之后观测期的每个月月初,将LR样方上调落物收集框收集到的凋落物均匀添加到对应的LA样方中。

1.2.2 土壤呼吸和土壤温湿度测定

利用Li-8100开路式土壤碳通量观测系统(美国LI-COR公司)测定土壤呼吸速率,用该仪器配套的电子温度探针和水分传感器对土壤表层10 cm处温度与湿度(体积含水量,%)进行测定。测定前在不扰动PVC土壤呼吸环的前提下将环内杂草、凋落物及其他杂物清除掉,保持土壤环在整个观测期内位置不变。本试验于2017年9月至2018年8月的每月月中和月末定期对CK、LR、LA处理样方的土壤呼吸进行测定,全年共测定24次。

1.3 数据处理与统计分析

采用单因素方差(one-way ANOVA)分析不同处理间土壤呼吸速率、土壤温度、土壤湿度的差异显著性,采用Least square difference (LSD)法进行多重比较,显著性水平设定为 $P=0.05$ 。采用指数回归模型 $R_s = a e^{bT}$ 分析观测期内土壤呼吸与土壤温度的

关系^[11]。式中, R_s 为土壤呼吸速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 以 CO_2 计), T 为土壤温度($^{\circ}\text{C}$), a 为 0°C 时的土壤呼吸速率, b 为温度反应常数。温度敏感系数由公式 $Q_{10} = e^{10b}$ 计算, 式中 b 为温度反应常数^[12]。数据统计采用 SPSS 19.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 进行, 采用 Sigmaplot 12.0 软件辅助作图。

2 结果与分析

2.1 不同凋落物处理方式下土壤温度的差异

在马尾松×红锥混交林中, 从 2017 年 9 月开始, CK、LR、LA 处理的土壤温度均逐月降低, 在 12 月达到谷值, 分别为 $(11.51 \pm 0.07)^{\circ}\text{C}$ 、 $(10.47 \pm 0.05)^{\circ}\text{C}$ 和 $(12.52 \pm 0.05)^{\circ}\text{C}$, 三者间差异显著 ($P < 0.05$) (图 1a)。随后, 土壤温度逐月上升, 在 2018 年 7 月达到峰值, CK、LR、LA 处理分别为 $(27.40 \pm 0.18)^{\circ}\text{C}$ 、 $(28.08 \pm 0.09)^{\circ}\text{C}$ 和 $(27.11 \pm 0.11)^{\circ}\text{C}$, 三者间差异显著 ($P < 0.05$)。

从土壤温度的季节变化来看, CK、LR、LA 处理的土壤温度均表现为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季 (表 1)。与 CK 相比, LR 处理提高了春季、夏季、秋季和冬季的土壤温度, 而 LA 处理则降低了春季、夏季和秋季的土壤温度, 但提高了冬季土壤温度。

CK、LR、LA 处理土壤年平均温度分别为 $(20.71 \pm 0.04)^{\circ}\text{C}$ 、 $(20.89 \pm 0.03)^{\circ}\text{C}$ 和 $(20.54 \pm 0.03)^{\circ}\text{C}$, 去除凋落物使混交林土壤温度显著升高, 而添加凋落物则会使土壤温度显著降低 (表 1)。

2.2 不同凋落物处理方式下土壤湿度的差异

从 2017 年 9 月开始, CK、LR、LA 处理的土壤湿度随月份的推移呈现无规则波动, 在 2018 年 1 月达到谷值, 分别为 $(17.01 \pm 0.77)\%$ 、 $(16.23 \pm 0.70)\%$ 和 $(15.26 \pm 0.08)\%$, 三者间差异不显著 ($P > 0.05$) (图 1b)。在 2018 年 7 月达到峰值, CK、LR、LA 处理分别为 $(27.82 \pm 0.98)\%$ 、 $(28.23 \pm 0.84)\%$ 和 $(29.95 \pm 0.36)\%$, 三者间差异不显著 ($P > 0.05$)。

从土壤湿度的季节变化来看, CK、LR、LA 处理的土壤湿度均表现为夏季显著高于其他季节 ($P < 0.05$)。与 CK 相比, LR 处理均降低各季节土壤湿度, 而 LA 处理则均提高各季节的土壤湿度 (表 1)。

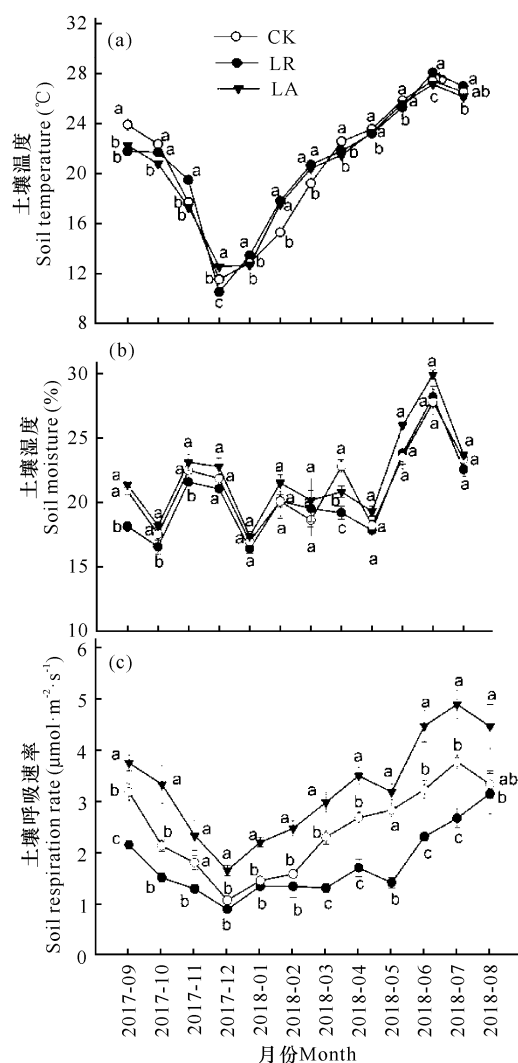
CK、LR、LA 处理土壤年平均湿度分别为 $(21.24 \pm 0.15)\%$ 、 $(20.44 \pm 0.14)\%$ 和 $(22.04 \pm 0.20)\%$, 去除凋落物使混交林土壤湿度显著降低, 而添加凋落物则会使土壤湿度显著升高 (表 1)。

2.3 不同凋落物处理方式下土壤呼吸的差异

2.3.1 土壤呼吸速率

在整个试验期, LA 处理各个月份的土壤呼吸速

率均高于对照, 而 LR 处理土壤呼吸速率则低于 CK (图 1c)。CK、LR、LA 处理土壤呼吸速率均自 2017 年 9 月开始, 随温度的降低而减低, 在 2017 年 12 月降到最低值, 此时, 三者的土壤呼吸速率 (以 CO_2 计) 分别为 $(1.07 \pm 0.07) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $(0.89 \pm 0.07) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $(1.65 \pm 0.07) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。之后, 土壤呼吸速率均呈上升趋势, LR 处理的土壤呼吸速率在 2018 年 8 月时达到最高值, 为 $(3.15 \pm 0.40) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 而 LA 处理土壤呼吸速率的最大值在 2018 年 7 月出现, 为 $(4.89 \pm 0.28) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 显著高于 CK 和 LR 处理。



不同小写字母表示同一处理不同月份间差异显著
Different letters indicate significant difference among different treatments in different months

图 1 不同凋落物处理方式下土壤温度、土壤湿度及土壤呼吸速率的月动态

Fig. 1 Monthly dynamics of soil temperature, soil moisture and soil respiration rate under different litter treatments
在各个季节, LR 处理均使得土壤呼吸速率降

低,而 LA 处理则显著提高土壤呼吸速率(表 1)。从土壤呼吸速率的季节变化来看,CK 和 LA 处理均表现为夏季>春季>秋季>冬季,而 LR 处理则表现为夏季>秋季>春季>冬季(表 1)。CK、LR 及 LA 处理的年平均土壤呼吸速率分别为(2.44±0.06)

$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、(1.76±0.12) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、(3.27±0.29) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,去除凋落物使土壤年均呼吸速率降低 27.88%,而添加凋落物则使其增加 34.02%,三者差异显著(表 1)。

表 1 不同凋落物处理方式下土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸速率的季节动态

Table 1 Seasonal variations of soil temperature, soil moisture and soil respiration rate under different litter treatments

指标 Index	处理 Treatment	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	年 Year
土壤温度 Soil temperature ($^{\circ}\text{C}$)	对照 CK	21.76±1.31Ba	26.31±0.51Aa	21.30±1.86Ba	13.20±1.11Ca	20.71±0.04b
	去除 LR	21.87±0.72Ba	26.77±0.82Aa	20.97±0.75Ba	13.90±2.13Ca	20.89±0.03c
	添加 LA	21.70±0.84Ba	26.27±0.44Aa	20.09±1.15Ba	14.24±1.65Ba	20.54±0.0a
土壤湿度 Soil moisture (%)	对照 CK	19.90±1.46Ba	24.91±1.46Aa	20.33±1.46ABa	19.67±1.43Ba	21.24±0.15b
	去除 LR	18.87±0.52Ba	24.88±1.71Aa	18.78±1.48Ba	19.22±1.42Ba	20.44±0.14c
	添加 LA	20.12±0.44Ba	26.56±1.82Aa	20.92±1.44Ba	20.58±1.63Ba	22.04±0.20a
土壤呼吸速率 Soil respiration ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	对照 CK	2.60±0.16Bb	3.44±0.17Ab	2.37±0.42Ba	1.37±0.15Cb	1.76±0.12c
	去除 LR	1.47±0.12Bc	2.71±0.24Ac	1.65±0.26Bb	1.19±0.15Bb	2.44±0.06b
	添加 LA	3.22±0.15Ba	4.61±0.14Aa	3.14±0.42Ba	2.10±0.24Ca	3.27±0.29a

注:表中数据为平均值±标准差。同一行不同大写字母表示同种处理不同季节的差异显著性,同一列不同小写字母表示相同季节(年)不同处理间的差异显著性

Note: Data in the table are mean ± standard deviation. Different capital letters in the same line indicate significant difference among the same treatment in different seasons, and different lowercases in the same column indicate significant difference among different treatments in the same season (year)

2.3.2 土壤呼吸累积排放量

CK、LR、LA 处理的春夏秋冬四季土壤呼吸累积排放量均表现为夏季显著高于其他季节($P < 0.05$),LR 处理可降低四季的土壤呼吸累积排放量,而 LA 处理则提高四季的土壤呼吸累积排放量(表 2)。CK、LR、LA 处理土壤呼吸的年累积排放量(以 C

计)分别为(9.51±0.12) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、(6.88±0.21) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和(12.70±0.53) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与 CK 相比,LR 处理使土壤呼吸年累积排放量降低 27.66%,而 LA 处理使其提高 33.54%,三者间差异显著($P < 0.05$)(表 2)。

表 2 不同凋落物处理方式下土壤呼吸季节及年累积排放量(以 C 计)

Table 2 Seasonal and annual CO_2 fluxes of soil respiration under different litter treatments (in C)

时段 Period	土壤呼吸累积排放量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) Accumulation emission fluxes of soil respiration		
	对照 Control	去除凋落物处理 Litter removal	添加凋落物处理 Litter addition
春季 Spring	2.48±0.07Bb	1.40±0.08Bc	3.07±0.10Ba
夏季 Summer	3.53±0.13Ab	2.81±0.17Ac	4.72±0.30Aa
秋季 Autumn	2.23±0.06Cb	1.56±0.06Bc	2.96±0.20Ba
冬季 Winter	1.27±0.02Db	1.11±0.07Cc	1.95±0.05Ca
年累积 Annual accumulation	9.51±0.12b	6.88±0.21c	12.70±0.53a

注:表中数据为平均值±标准差。同一列不同大写字母表示同种处理不同季节的差异显著性,同一行不同小写字母表示相同季节(年)不同处理间的差异显著性

Note: Data in the table are mean ± standard deviation. Different capital letters in the same column indicate significant difference among the same treatment in different seasons, and different lowercases in the same line indicate significant difference among different treatments in the same season (year)

2.4 土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度的关系

由图 2 可以看出,CK、LR、LA 处理的土壤呼吸速率与土壤温度的关系均呈极显著指数正相关关系

(图 2a,表 3),而与土壤湿度之间的关系不显著(图 2b)。CK、LR、LA 处理中,土壤温度分别解释了土壤呼吸速率 94.28%、74.26%和 93.31%的变异。 Q_{10}

值作为衡量土壤呼吸与温度之间关系的重要参数,反映其对温度的敏感性,即温度每升高 10℃ 土壤呼吸增加的倍数。CK、LR、LA 处理的 Q_{10} 值分别为 2.01, 2.13 和 1.94, 温度敏感性表现为 LR>CK>LA, 说明去除凋落物增加了土壤呼吸温度敏感性系数 Q_{10} 值, 而添加凋落物则降低了 Q_{10} 值。

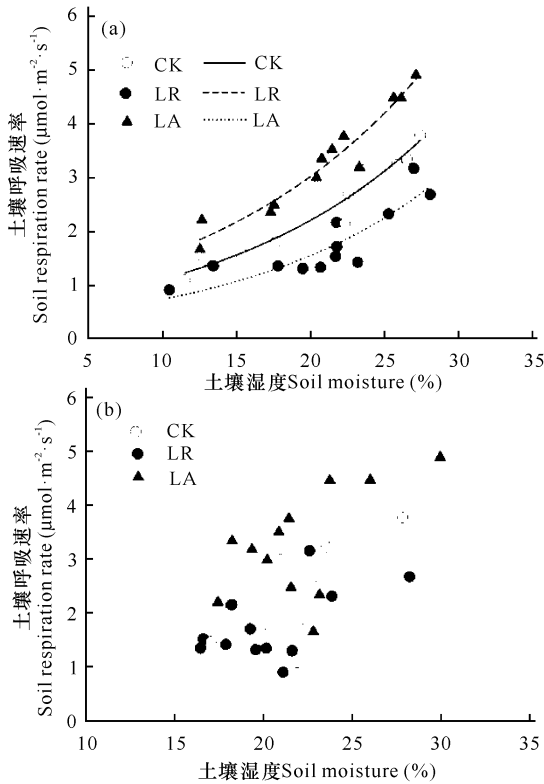


图 2 不同凋落物处理方式下土壤呼吸速率与土壤温度、土壤湿度的回归关系

Fig. 2 Regression relationships between soil respiration rate, soil temperature and soil moisture under different litter treatments

表 3 不同凋落物处理方式下土壤呼吸速率与土壤温度的指数关系模型

Table 3 Exponential relationship model between soil respiration rate and soil temperature under different litter treatments

处理 Treatment	a	b	参数 Variable			
			N	R ²	p	Q ₁₀
CK	0.541 0	0.069 9	12	0.942 8	<0.001	2.01
LR	0.338 6	0.075 5	12	0.742 6	<0.001	2.13
LA	0.797 9	0.066 3	12	0.933 1	<0.001	1.94

注: 指数回归模型 $R_s = ae^{bT}$

Note: Exponential regression model $R_s = ae^{bT}$

2.5 凋落物对土壤呼吸的贡献

图 3 反映了观测期各月凋落物对土壤呼吸速率影响的变化。LR 和 LA 处理对土壤呼吸速率的影响幅度在不同月份内表现不同, 其中 LR 处理对土壤呼

吸速率的影响在 2018 年 8 月最小, 降幅为 4.91%, 在 2018 年 5 月影响最大, 降幅为 49.22%, 土壤呼吸速率平均降幅为 26.11%。而 LA 处理对土壤呼吸速率的影响在 2017 年 10 月最大, 增幅达 60.02%, 在 2018 年 5 月影响最小, 增幅为 13.9%, 土壤呼吸速率平均增幅为 38.48%。

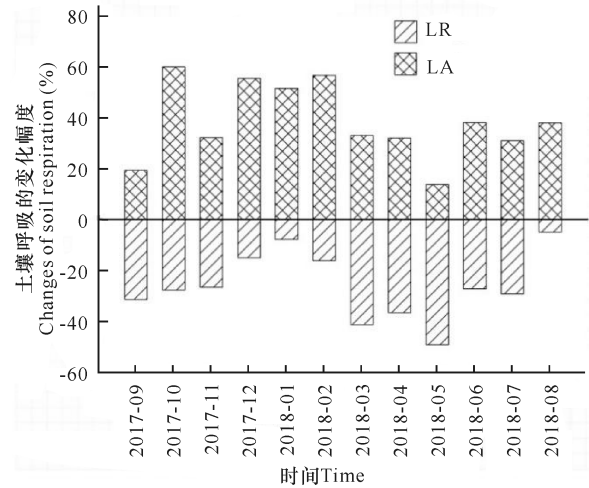


图 3 去除凋落物和添加凋落物对土壤呼吸速率的影响

Fig. 3 Effects of soil respiration rate induced by litter removal and litter addition

3 讨论

3.1 凋落物对土壤呼吸的影响

凋落物是森林生态系统的重要组成部分, 对生态系统的土壤肥力、植物生长发育及生态系统持续发展具有重要影响。凋落物是土壤微生物的主要底物来源, 其输入量的改变会引起土壤微生物群落结构与功能的改变, 从而影响土壤呼吸^[6]。凋落物的去除和添加可以改变土壤有机质的供应, 影响地表微环境条件(土壤温度、土壤湿度等因子), 进而降低或增加土壤呼吸速率^[13]。通常, 添加凋落物会显著提高土壤呼吸速率, 而去除凋落物则使土壤呼吸速率显著降低^[14]。而且, 由于额外的凋落物输入可能会刺激现存凋落物的分解, 添加凋落物所引起的土壤呼吸的增加程度可能会远大于去除凋落物所引起的土壤呼吸的降低程度^[15]。一般情况下, 去除凋落物会使土壤呼吸速率降低 7%~60%^[16]。本研究中, 经过为期 1 年的凋落物去除和添加处理, 马尾松×红锥异龄混交林土壤呼吸速率的月、季度及年度的均值均呈现出 LA>CK>LR 的规律, 去除凋落物使土壤年均呼吸速率降低 27.88%, 在 7%~60% 的区间内, 与马尾松林的 24.96%^[17]、木荷林的 25.32%^[8]、樟树林的 26.49%^[10] 较为接近, 而高于枫香林的 18.61%^[10] 和杉木林的 14.97%^[9], 低于华北落叶松林的

40.16%^[18]。这种差异可能与研究区域、林分类型、土壤质量的不同有关。本研究中,添加凋落物使土壤年均呼吸速率增加 34.02%,与樟树林的 36.16%、樟树×马尾松混交林的 30.12%^[19]接近,而高于马尾松林的 27.36%^[17]、木荷林的 17.86%^[8]、杉木林的 17%^[9],低于枫香林的 71.31%^[10]。不同林分添加凋落物后,土壤呼吸增加幅度的差异可能与林分凋落物的数量、质量以及分解速度相关。

3.2 凋落物处理方式对土壤呼吸与土壤温度、湿度关系的影响

多数研究表明,森林土壤呼吸主要受温度的影响,温度可解释大部分土壤呼吸的日变化及季节变化^[20]。温度对土壤呼吸的影响主要是通过对土壤微生物活性及根系生长的影响,进而影响土壤呼吸^[21]。一般情况下,土壤温度的季节性变化造成了土壤呼吸在时间尺度上的变化^[22]。本研究建立了土壤呼吸与温度的指数模型,结果表明土壤温度与 3 种凋落物处理方式下的土壤呼吸均呈极显著指数关系($P < 0.01$),土壤温度能够单独解释观测期两林分土壤呼吸变化的 83.87%~94.28%,说明土壤温度的变化可以很好地解释土壤呼吸在时间尺度上的变异性。这与王光军等^[23]对亚热带杉木和马尾松群落土壤呼吸的研究结果相似。此外,土壤温度与 3 种凋落物处理方式下的土壤呼吸相关性系数 R^2 的大小表现为 $CK(0.9428) > LA(0.9331) > LR(0.7426)$,这表明添加凋落物与去除凋落物均会使土壤温度与土壤呼吸的相关性降低。

土壤湿度是影响土壤呼吸的另一重要因子,但其对呼吸速度影响较为复杂,往往同时取决于温度的配置状况,其主要是通过调节与控制植物和微生物的生理活动、微生物的能量供应、土壤的通透性和气体的扩散等来影响土壤呼吸^[24]。本研究中,3 种处理的土壤呼吸与土壤湿度的回归分方程拟合度不显著,不能单独分析土壤湿度对土壤呼吸的影响。这与杨玉盛等^[25]的报道结果相似,可能是因为研究区处于南亚热带地区,全年降水充沛,雾日多,土壤比较湿润,适合植物根系以及土壤微生物生长,因此水分并没有成为土壤呼吸的限制因子。本研究期间林分土壤湿度平均值为 15.92%~27.82%,这可能是适合微生物活动的正常范围,而土壤温度对土壤呼吸季节变化强烈的调控可能在一定程度上掩盖了土壤湿度对呼吸季节变化的影响。

3.3 不同凋落物处理方式下的土壤呼吸温度敏感性 Q_{10}

Q_{10} 值是反映土壤呼吸对温度变化的敏感程度

的重要指标,其意义为土壤温度每升高 10℃,土壤呼吸增加的倍数。关于陆地生态系统土壤呼吸及组分的研究表明, Q_{10} 值的变化大部分在 1.3~3.3^[26],一般在高纬度地区 Q_{10} 值比较大,在低纬度地区 Q_{10} 值比较小,在冬季 Q_{10} 值比较大,在夏季 Q_{10} 值比较小^[27-28]。Zheng 等^[29]研究发现我国亚热带森林 Q_{10} 值为 1.56~2.39。本研究中混交林自然条件下的 Q_{10} 值为 2.03, Q_{10} 值的大小处在正常范围。有研究表明,针叶林的 Q_{10} 值大于针阔混交林^[30]。牟守国^[31]对温带阔叶林、针叶林和针阔混交林土壤呼吸的比较研究发现针叶林比针阔混交林具有更高的温度敏感性。韩天丰等^[32]和樊金娟等^[33]的研究结果也与之相似。本研究中,3 种处理土壤呼吸的 Q_{10} 值表现为 $LR(2.13) > CK(2.01) > LA(1.94)$,说明去除凋落物增加了土壤呼吸的 Q_{10} 值,而添加凋落物降低了土壤呼吸的 Q_{10} 值。本研究结果与赵文君等^[34]的研究结论一致。

4 结论

本研究表明,凋落物处理对马尾松×红锥混交林的土壤呼吸产生显著影响。去除凋落物提高了土壤温度和土壤呼吸温度敏感性系数 Q_{10} 值,但降低了土壤湿度和土壤呼吸速率。添加凋落物则降低了土壤温度和 Q_{10} 值,提高了土壤湿度和土壤呼吸速率。去除凋落物使土壤呼吸年累积排放量降低 27.66%,而添加凋落物则使其提高 33.54%。

参考文献

- [1] WOODWELL G M, WHITTAKER R H, REINERS W A, et al. The biota and the world carbon budget [J]. *Science*, 1978, 199(4325): 141-146.
- [2] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [3] VALENTINI R, MATTEUCCI G, DOLMAN A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests [J]. *Nature*, 2000, 404(6780): 861.
- [4] HOUGHTON R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(6): 945-958.
- [5] REY A, PEGORARO E, TEDESCHI V, et al. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(9): 851-866.
- [6] FANG X, ZHAO L, ZHOU G, et al. Increased litter input increases litter decomposition and soil respiration

- but has minor effects on soil organic carbon in subtropical forests [J]. *Plant and Soil*, 2015, 392(1/2): 139-153.
- [7] 李晓杰,刘小飞,熊德成,等. 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[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(5): 447-457.
- [8] 高强,马明睿,韩华,等. 去除和添加凋落物对木荷林土壤呼吸的短期影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(5): 1189-1197.
- [9] 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.
- [10] 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, 29(2): 643-652.
- [11] LUO Y, WAN S, HUI D, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, 413(6856): 622-625.
- [12] XU M, QI Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(3): 687-696.
- [13] KUZUYAKOV Y. Ecology: Prime time for microbes [J]. *Nature Climate Change*, 2011, 1(6): 295-297.
- [14] BOONE R D, NADELHOFFER K J, CANARY J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration [J]. *Nature*, 1998, 396(6711): 570-572.
- [15] WANG Q, HE T, WANG S, et al. Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178: 152-160.
- [16] SAYER E J, TANNER E V J, LACEY A L. Effects of litter manipulation on early-stage decomposition and meso-arthropod abundance in a tropical moist forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 229(1/2/3): 285-293.
- [17] 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.
- [18] 彭信浩,韩海荣,徐小芳,等. 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[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5351-5361.
- [19] 张超. 凋落物对亚热带4种森林土壤呼吸的影响[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2013.
- [20] LIU X, WAN S, SU B, et al. Response of soil CO_2 efflux to water manipulation in a tall grass prairie ecosystem [J]. *Plant & Soil*, 2002, 240(2): 213-223.
- [21] VOSE J M, RYAN M G. Seasonal respiration of foliage, fine roots, and woody tissues in relation to growth, tissue N, and photosynthesis [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(2): 182-193.
- [22] 朱宁. 中亚热带不同常绿阔叶林群落土壤呼吸及其影响因素研究[D]. 福州:福建师范大学, 2010.
- [23] 王光军,田大伦,闫文德,等. 亚热带杉木和马尾松群落土壤系统呼吸及其影响因子[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 53-62.
- [24] DAVIDSON E A, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [25] 杨玉盛,陈光水,王小国,等. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(7): 1684-1690.
- [26] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1992, 44(2): 81-99.
- [27] KEITH H, JACOBSEN K L, RAISON R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest [J]. *Plant & Soil*, 1997, 190(1): 127-141.
- [28] KIRSCHBAUM M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27(27): 753-760.
- [29] ZHENG Z M, YU G R, FU Y L, et al. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(7): 1531-1540.
- [30] PENG S, PIAO S, TAO W, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5): 1008-1014.
- [31] 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(4): 564-570.
- [32] 韩天丰,周国逸,李跃林,等. 中国亚热带森林不同演替阶段土壤呼吸的分离量化[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(9): 946-954.
- [33] 樊金娟,李丹丹,张心昱,等. 北方温带森林不同海拔梯度土壤碳矿化速率及酶动力学参数温度敏感性[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 17-24.
- [34] 赵文君,吴鹏,崔迎春,等. 喀斯特原生乔木林和次生林土壤呼吸研究[J]. *林业工程学报*, 2015, 29(2): 105-110.

Effects of Litter Removal and Addition on Soil Respiration in a *Pinus massoniana* × *Castanopsis hystrix* Mixed Plantation

QIN Zhiwei¹, ZHOU Xiaoguo¹, WEN Yuanguang^{1,2}, ZHU Hongguang^{1,2}, LI Haiyan¹,
NGUYEN Huu Duy¹, CAI Daoxiong^{2,3}, JIA Hongyan^{2,3}, HUANG Xueman^{1,2},
YOU Yeming^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Guangxi Youyiguang Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi, 532600, China; 3. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi, 532600, China)

Abstract: In order to investigate the effect of changes of litter input on the carbon emission of *Pinus massoniana* × *Castanopsis hystrix* mixed plantations, the *P. massoniana* × *C. hystrix* mixed plantations was taken as the research object, and the effects of litter treatment on soil respiration were studied by adding and removing litter to artificially alter carbon input. The results showed that litter removal could reduce soil moisture and increase soil temperature, while litter addition increased soil moisture and decreased soil temperature. The removal of litter significantly reduced the average annual respiration rate of soil by 27.88%, while the addition of litter increased the annual average respiration rate of soil by 34.02%. The removal treatment of litter could reduce the cumulative emission of soil respiration in four seasons, while the addition of litter increased the cumulative emission of soil respiration in four seasons. The cumulative annual emission of soil respiration of control, litter removal and addition treatments was $(9.51 \pm 0.12) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $(6.88 \pm 0.21) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $(12.70 \pm 0.53) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. The cumulative annual emission of soil respiration was reduced by 27.66% after the removal of litter treatment, while the addition of litter increased the cumulative annual emission of soil respiration by 33.54%. Soil respiration rate and soil temperature were significantly correlated with different litter treatments. Soil temperature explained 74.26%~94.28% variation of soil respiration rate. The removal of litter treatment increased the soil respiration temperature sensitivity coefficient Q_{10} , while the addition of litter decreased the Q_{10} value. Litter treatment had significant effects on soil respiration in the *P. massoniana* × *C. hystrix* mixed plantation, which proved that litter played an important role in changing soil respiration and carbon cycle of forest ecosystems.

Key words: *Pinus massoniana* × *Castanopsis hystrix* mixed plantation, litter, soil respiration, soil temperature

责任编辑: 陆 雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>