

DOI: 10.5846/stxb201608031593

陈灿, 江灿, 范海兰, 林勇明, 吴承祯. 凋落物去除/保留对杉木人工林林窗和林内土壤呼吸的影响研究. 生态学报, 2017, 37(1): - .

Chen C, Jiang C, Fan H L, Lin Y M, Wu C Z. Effects of removing/keeping litter on soil respiration in and outside the gaps in chinese fir plantation. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): - .

凋落物去除/保留对杉木人工林林窗和林内土壤呼吸的影响研究

陈 灿^{1,4,*}, 江 灿², 范海兰^{1,4}, 林勇明^{1,4}, 吴承祯^{3,*}

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 湖南省娄底第一中学, 娄底 417000

3 武夷学院生态资源工程系, 南平 354300

4 福建农林大学海洋研究中心, 福州 350002

摘要:为探讨去除/保留凋落物对林窗内外杉木人工林土壤呼吸的影响、明确去除/保留凋落物条件下杉木人工林林窗内外土壤呼吸主要影响因子,改进经营管理措施和保持杉木人工林的可持续发展,本研究在福州白沙国有林场选取本底基本相同和经营措施接近的 12 年生杉木人工林及其林窗,分别采用去除和保留凋落物处理,在每月晴好天气通过 Licor-8100A 对其凋落物量、土壤呼吸、土壤温度、湿度进行了 1 年(2014 年 3 月—2015 年 2 月)的定点观测,在此基础上分析不同凋落物输入量处理下杉木人工林窗内外土壤呼吸与环境因子的动态特征、土壤呼吸和环境因子关系,结合方差分析等解释土壤呼吸的拟合模型,结果表明:1) 杉木林林窗、林内土壤呼吸速率年平均值分别为 2.47 和 $2.13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;去除凋落物后,分别减少了 22.89%、25.89%;林窗内外均是 7 月份出现最大值,去除凋落物后分别为 3.65 ± 0.14 和 $2.85 \pm 0.08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;保留凋落物分别为 4.26 ± 0.34 和 $3.61 \pm 0.34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;1 月值最小,去除凋落物分别为 0.9 ± 0.04 和 $0.83 \pm 0.03 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,保留凋落物分别为 1.02 ± 0.041 和 $0.92 \pm 0.05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。2) 土壤温度和湿度共同解释了杉木人工林林窗内外土壤呼吸 68.63%—77.28%;3) 林窗、林内去除和保留凋落物处理的土壤呼吸与土壤 5cm 深的温、湿度间显著相关;4) 林窗、林内土壤温、湿度的双因素模型均比单因素模型能更好地解释土壤呼吸的动态变化。林窗、林内去除凋落物的土壤呼吸温度敏感系数 Q_{10} 值分别为 1.39 和 1.37,差异不显著($P=0.634$);保留凋落物的 Q_{10} 值分别为 1.40 和 1.55,差异显著($P=0.010$)。研究结果为揭示杉木人工森林生态系统碳通量以及其驱动机制提供理论基础。

关键词:土壤呼吸;林窗;碳源;杉木

Effects of removing/keeping litter on soil respiration in and outside the gaps in chinese fir plantation

CHEN Can^{1,4,*}, JIANG Can², FAN Hailan¹, LIN Yongmin¹, WU Chengzhen^{3,*}

1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China

2 No 1 Middle School of Loudi Hunan, 417000, Loudi, China

3 Department of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, China

4 Ocean Research Centre of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China

Abstract: In this paper, in order to discuss the effects of removing/keeping litter on soil respiration (SR) in/out of the gaps, clearly put forward the major factors influencing SR under these situations, improve the managements, and keep sustainable development of Chinese fir plantation, 12 years-old Chinese fir plantations and their gaps in similar sites and

基金项目:福建省自然科学基金(2015J05048);国家林业局杉木工程技术研究中心孵化基金(6213C011106)

收稿日期:2016-08-03; **修订日期:**2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chencan_cc@126.com, fjwcz@126.com

with same managements at Fuzhou Baisha State-owned Forest were set up and chosen, respectively, to study SR differences, relationships between SR and other environments, SR fitting models in and outside of forest gaps under the circumstances of keeping or moving litter falls in the plots. SR, and soil surface temperature and moisture were measure in several fixed sample plots by Li-8100A during the fine days per month from March, 2014 to February, 2015 in order to analyze the month dynamic characteristics of SR, environment factors and the relations between the two with different carbon inputs in or out of the Chinese Fir forest gaps combining with variance analysis. The results showed that 1) the anural average values of SRs in and outside of Chinese fir plantations were 2.47 and $2.13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectively, and that it would decrease 22.89% and 25.89% respectively while removing the cover litter fall. In or out of the gaps of the forests, both the maximum values of SR appearing in July were 3.65 ± 0.14 and $2.85 \pm 0.08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ after removing litter respectively, and were 4.26 ± 0.34 and $3.61 \pm 0.34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ by keeping litter, respectively. And the minimum ones contemporarily emerging in January were 0.9 ± 0.04 and $0.83 \pm 0.03 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ after taking off the liter respectively, and were 1.02 ± 0.041 and 0.92 ± 0.05 by holding litter respectively. 2) Soil temperature together with moisture could account for 68.63%—77.28% of the total SR totally; 3) the relationships between soil respirations and soil temperatures/moistures are significant correlations with large correlation coefficient in the depth less than 5cm in the soil; 4) all the two-factor models were better than the single-factor ones of soil temperature and moisture in explaining the dynamic variances of SR in/out the gaps in Chinese fir plantations; Soil sensitive coefficient (Q_{10}) of SR when wiping off litters in/out Chinese fir forest were 1.39 and 1.37, respectively, which were not significant ($P=0.634$), while Q_{10} were 1.40 and 1.55 when keeping litters in/out of gaps in Chinese fir plantations, respectively, which were significant ($P=0.010$). The results could provide the thesis foundation for carbon flux and its mechanism in the ecosystem of Chinese fir plantation.

Key Words: Carbon flux; litter-fall; Chinese fir; gap

1 前言

土壤呼吸在区域及全球尺度上碳循环的调控具有十分关键的作用^[1-3],准确测定森林土壤呼吸是森林碳汇或源估算的重要基础,也是森林生态学研究的重要内容^[4-5]。由于森林生态系统土壤呼吸具有空间和时间上的变化特性^[6-8],空间上即使较小的范围内,也会受到局地小气候、植被类型、土地利用、土壤 pH 值等因素的影响表现出巨大的差异性^[9-10];时间上季节和年际的变化造成气温、降水、土壤温度、植物根系和土壤微生物活力的差异进而也会影响到土壤呼吸的速率^[13-15],因此,越来越多的学者尝试通常对某一或某些因子的控制来分析其对土壤呼吸影响作用机制和规律^[16-18],使得土壤呼吸的影响机制研究成为生态学等领域的一个研究热点^[19]。

杉木是我国南方主要的人工林和用材林,种植面积大,使用用途广,杉木林土壤呼吸的研究是森林生态系统碳汇或源研究的重要组成部分,对 20 年生杉木人工林土壤呼吸的研究发现三明地区杉木林的土壤呼吸季节变化呈单峰曲线^[20],敏感性要高于格氏栲林^[6],然而由于在我国种植跨地域大,自然环境等均存在不同程度差异^[21],造成杉木林土壤呼吸的影响因子众多,机制复杂,特别是人工用材林中由于伐区设计和采伐等经营管理措施,林窗在不同年龄的杉木人工林中普遍存在。林窗阶段是森林物质循环和能量流动的起点,在森林的更新和演替过程中扮演着非常重要的角色^[22],其发展方向在一定程度上决定了未来森林更新演替过程中碳通量的变化趋势,然而目前有关改变凋落物后林窗、林内土壤呼吸比较的研究少有见报道。

碳源输入的变化改变了土壤的理化性质^[23],进而对于土壤内部的根系和微生物的呼吸作用产生影响,特别是凋落物影响杉木人工林土壤呼吸的主要因子之一^[24],但去除/保留凋落物这种改变碳源输入方式是否会大幅改变整个杉木林窗内土壤呼吸的速率及其季节动态变化等,目前还未知,因此本研究拟对在去除/保留凋落物背景下对杉木人工林窗内外的碳通量进行测量。研究内容主要包括:1) 去除/保留凋落物下杉木人工

林林窗内外土壤呼吸的月动态特征;2)影响杉木人工林林窗内外土壤呼吸的主要影响因子及影响程度;3)去除/保留凋落物下林窗内外土壤温度、湿度和土壤呼吸间的关系特征。通过以上研究探讨杉木人工林林窗内外土壤呼吸在去除/保留凋落物受到的影响及主要影响因子,为改进经营管理措施、精确估测杉木人工林土壤碳通量和保持杉木人工林的可持续发展等提供理论依据。

2 研究区概况

本研究样地位于福建省白沙国有林场,地处福建省闽侯县西部,距县城约 8 km (E119.07618°, N26.20597°)。属于中亚热带季风气候,夏季长无酷暑,冬季短且无严寒,境内年平均气温 14.8 ℃—19.5 ℃。夏季和冬季月平均气温分别为 23.6 ℃—29.3 ℃和 6 ℃—10.5 ℃。年平均最高和最低温分别为 23.6 ℃和 16.4 ℃;极端最高气温达 38 ℃—40.6 ℃,极端最低气温为-4 ℃。境内年降雨量 1200 mm—2100 mm,年平均降水量为 1673.9 mm,平均雨日 150 d,占全年日数的 41.8%。年无霜期 240—320 d。土壤为南方红壤。林下植被主要有井栏边草 (*Pteris multifida*)、栀子 (*Gardenia jasminoides* Ellis)、芒箕 (*Gleichenia linearis* Clarke)、山麦冬 (*Liriope spicata* (Thunb.) Lour)、狗脊蕨 (*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.)、铁线蕨 (*Adiantum capillus-veneris* L)、蛇葡萄 (*Ampelopsis sinica* (Mig) W.T.Wang)、苔草 (*Carex tristachya*) 等。

表 1 杉木人工林试验地基本特征
Table 1 Site characteristics in Chinese fir plantations

林龄/年 Stand age	龄组 Age class	平均胸径/cm Mean DBH	平均树高/m Mean tree height	坡度 Slope	坡向 Aspect	密度/(株/hm ²) Stem density
12	中龄	12.2	13.1	25	西南	1280

表 2 杉木人工林(0—20cm)的土壤理化性质
Table 2 Soil physical and chemical characteristics at 0—20cm depth along the Chinese fir plantation

因子 Factors	土壤碳 Soil C/(mg/g)	土壤氮 Soil N/(mg/g)	pH 值 pH value	土壤密度 Soil density/(g/cm ³)	郁闭度 Crown density
CF12	14.32	1.11	10.02	1.44	0.7

3 研究方法

3.1 土壤呼吸的测量

在研究地选择 12 年的杉木林(CF12),采用去除凋落物(Litter exclusion, EL)和对照(Control, CK)2 种处理^[15-24],每个样方大小为 2×2 (m),其内设置有 1 个圆柱形内径为 20 cm 的 PVC 土壤碳通量测室,测室环露出土壤表面在东西南北四个方向均为 5cm,同时剪去环内植物的地上部分,对照内保留凋落物。每个重复样方相距 5m 以上。共布设 6 个 PVC 测室。另选取 3 个面积为 10m²的林窗(林窗产生时间超过 1 年)进行比较,在林窗中心位置设置 3 个 2m×2m 的区组,去除凋落物的处理同上。一共 12 个测室。自 2014 年 3 月至 2015 年 2 月间每月月末晴好天气早上 9 点至 11 点间用 Li-8100A 土壤碳通量仪对杉木人工林林窗内外土壤呼吸、土壤表层 5cm 温湿度进行测定(温湿度传感器埋入土壤深度为 5cm),每个测室每次测量时间为 2 分钟。一年共计 12 次外业测量。

3.2 数据分析

土壤呼吸的温度敏感系数(Q₁₀)是土壤温度升高 10 ℃所引起的土壤呼吸速率增加的倍数^[20-25],表示土壤呼吸速率对土壤温度的敏感程度,可以用来描述土壤呼吸对土壤温度变化的敏感程度^[26-27],依地理位置和生态系统类型的不同相差很大,从略大于 1(低敏感)直到大于 10(高敏感)。本研究将土壤呼吸作为因变量,土壤温度为作为自变量,利用直线模型、指数模型、Q₁₀模型分析土壤温度与土壤呼吸的关系^[28],决定系数(R²)表示土壤解释为占多少的土壤呼吸变化,决定拟合系数。各模型如下:

直线模型

$$R_s = a + bT_s \quad (1)$$

式中, R_s 为土壤呼吸; 为 T_s 土壤温度; a 为常数, b 为一次项系数;

指数模型

$$R_s = ae^{bT_s} \quad (2)$$

式中, R_s 为土壤呼吸; 为 T_s 土壤温度; a 为常数, b 为一次项系数。

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (3)$$

式中, b 即土壤呼吸与土壤温度指数模型的温度反应系数。

数据处理和出图由 excel 2010 和 SPSS20.0 完成。

4 结论与讨论

4.1 去除/保留凋落物杉木人工林林窗、林内土壤呼吸的月动态变化特征

杉木人工林土壤呼吸主要限制因子是土壤表层温度, 月份动态变化趋势为单峰曲线^[20]。去除/保留凋落物对林窗与林内外土壤呼吸速率没有改变这种趋势, 7 月达到极大值, 之后逐渐递减, 1 月达到极小值, 但去除凋落物后林内和林窗内土壤呼吸均会下降, 且生长季(5—10 月) 的下降程度要高于非生长季(图 1)。林窗内, 年均值相差 $0.46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 生长季(5—10 月) 的均值差值达到 $0.58 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 保留凋落物最高值为 $4.26 \pm 0.34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 比去除凋落物高出 16.71%; 最低值为 $1.02 \pm 0.041 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 较去除凋落物高出 13.3%。

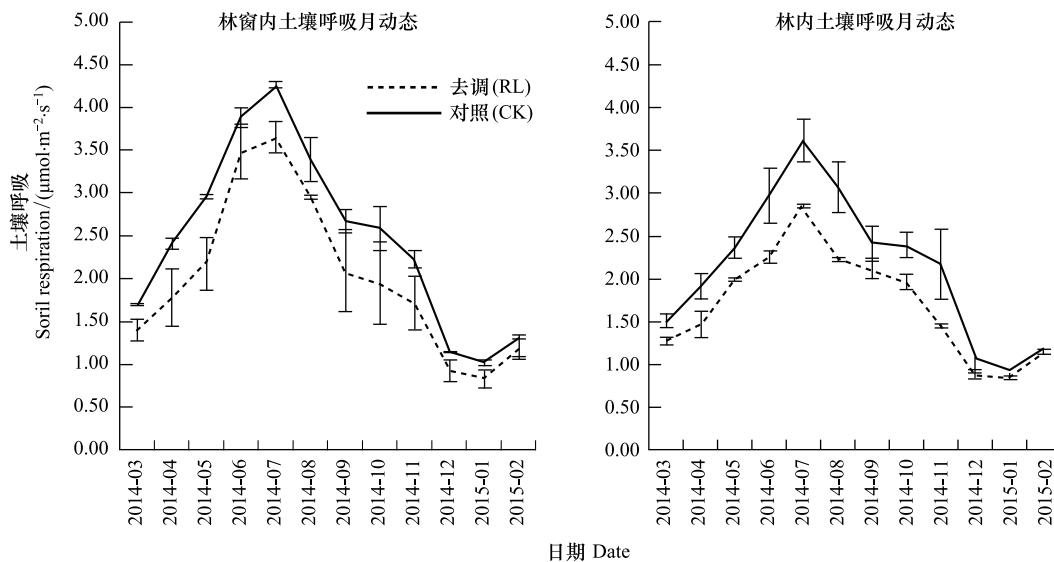


图 1 杉木人工林林窗内外土壤呼吸月变化

Fig.1 Month variations of soil respiration in/out of the gaps in Chinese fir plantation

凋落物虽然不能改变季节变化对土壤呼吸的影响趋势, 但仍具有一定的调节性。方差分析表明: 林窗内去除凋落物与对照处理在 4、5、10、11 月份存在显著差异 ($P < 0.05$); 林内去除凋落物与对照处理在 4、5、6、10、11 和 12 月存在显著差异 ($P < 0.05$); 林窗与林内去凋处理全年差异不显著 ($P > 0.05$); 林窗与林内对照处理全年除 3、4、5 月存在显著差异 ($P < 0.05$), 其它均不存在显著差异。这一变化趋势上与前人研究相似^[6, 29-30], 季节的变化改变土壤温度是森林土壤呼吸的主要影响因子^[9], 但凋落物作用也不应被忽视, 去除凋落物后土壤呼吸速率明显下降, 主要原因极可能是凋落物自身分解过程会释放物质进入土壤^[23], 增加土壤碳源并改变表层土壤的温湿度等理化性质, 间接影响根系和土壤微生物活性, 从而改变土壤呼吸速度。但这种影响又有一定滞后性, 除了 4、5 月和 10、11 月份与保留凋落物差异显著外, 这一差异均延长了一个月, 这两个时间段为春夏和秋冬的交界, 在温度和降水方面有显著差异。

森林土壤呼吸受到多因子的影响。本研究测量的土壤呼吸值远高于前人在中国会同所测得的 20 年杉木人工林土壤呼吸值^[6],说明在不同地域不同年龄的杉木人工林中土壤呼吸差异较大,另一可能原因是 12 生杉木还处于生长速率较快的中龄林,根系和土壤中微生物的活跃度可能要高于 20 年生杉木林。虽然随着林生年龄的增长,由根系引起的那部分土壤呼吸值会下降,但是否与年龄成比例下降,还不得而知。此外,土壤呼吸最大值出现在 7 份,与前人研究相比迟了 1 个月,年呼吸值也略高^[6],主要原因极可能是两地土壤最高温出现时间不同,以及林分的年龄结构等差异。

4.2 去除/保留凋落物林窗、林内土壤温度和湿度的变化特征

林窗 5cm 深土壤温度表现为夏高冬低,基本呈现出单峰曲线。林窗去除凋落物年土壤 5cm 深年均温度为 $17.68 \pm 0.21^\circ\text{C}$,生长季(5—10 月)的土壤温度为 $22.87 \pm 0.37^\circ\text{C}$,去除凋落物生长季比土壤年均温度高 29.35%。林窗保留凋落物土壤年均温度为 $18.32 \pm 0.08^\circ\text{C}$,生长季为 $23.8 \pm 0.08^\circ\text{C}$,极大值和极小值分别为 $29.74 \pm 0.19^\circ\text{C}$ 和 $7.58 \pm 0.17^\circ\text{C}$,年变化幅度为 $7.58\text{—}29.74^\circ\text{C}$ (图 2)。没有凋落物覆盖,地表日温差和季节温差均会加大,杉木人工林中凋落物的厚度虽然通常不会超过 5 cm,且保水性等性能不如一些阔叶树种,但凋落物的天然的木质性比非生物的土壤物理结构在调控温差方面仍有较大优势。因此,杉木人工林地下凋落物应加以长时间保留,避免不必要的人为移除和破坏。

林内土壤温度略高于林内,保留凋落物比去除凋落物处理温度高,差异较显著。去除凋落物处理的年均土温为 $16.61 \pm 0.08^\circ\text{C}$,年变幅为 $7.22\text{—}26.01^\circ\text{C}$,生长季(5—10 月)的土温为 $21.57 \pm 0.09^\circ\text{C}$,去除凋落物生长季比年均土壤温度高 29.86%;保留凋落物的土壤年均温度为 $17.64 \pm 0.83^\circ\text{C}$,年变幅为 $7.31\text{—}28.15^\circ\text{C}$;生长季为 $23.15 \pm 0.87^\circ\text{C}$,高出去除凋落物处理的 31.23%。方差分析表明:林窗两种处理间除 7、10、11 月,其它各月份各处理均存在显著差异($P < 0.05$),林内两种处理在 5、6、8、12、1 月间存在显著差异($P < 0.05$)。

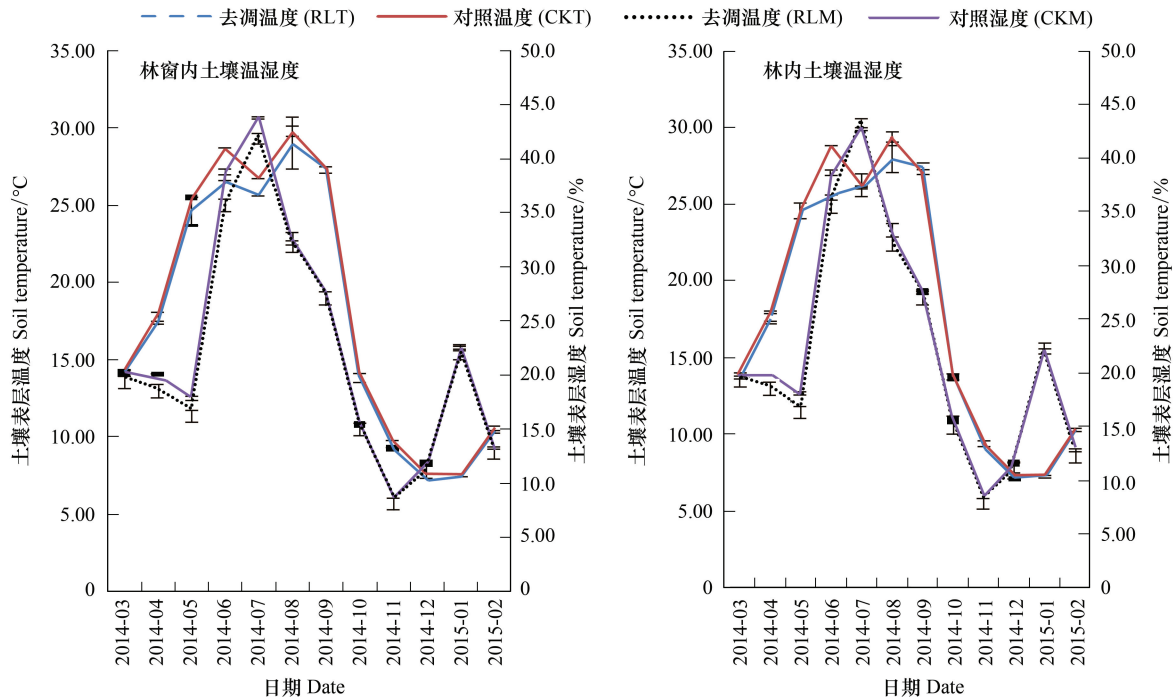


图 2 杉木人工林林窗内外土壤温度和湿度月变化

Fig.2 Month variations of soil temperatures in/out of the gaps in Chinese fir plantation

林窗、林内土壤湿度的季节变化没有显著的规律性,月份间波动较大。在林窗、林内样地内,土壤水分含水量大多集中在 20—30%之间,夏季普遍含水量较大,7 月达到最高,11 月最低(图 2)。方差分析发现:两种林分土壤含水量差异不显著,但林窗去除凋落物和对照处理间在 3、4、5、6 月存在显著差异($P < 0.05$),林内去

除凋落物和对照处理间除 8、9、11 月份以外,其它各月处理均存在显著差异($P<0.05$)。主要原因受当地降水量季节变化影响大,除此以外,还与土壤的下渗能力、土壤蒸发与植物的蒸腾作用有关。

杉木凋落物对土壤具有一定的保温作用,保湿作用不明显。杉木叶不易分解与汲水,对造成土壤表层的持水能力要弱于阔叶林和天然林。由于失去冠层的遮挡,受太阳直射,林窗内温度波动性要高于林内,但对于土壤温度而言有滞后性。去除凋落物后对生长季的影响更大,夏季的高温极大值也远大于林内。在生长季特别是春季雨季,降水频繁,有利于凋落物在林窗中保持水分的功能;夏季对林内的水分影响差异小,其它季节差异大的特点。当夏季高温时,去除和保留凋落物差异不显著,主要原因可能是凋落物还没有达到一定的厚度,高温天气起主导作用。

4.3 去除/保留凋落物下杉木人工林林窗内外土壤呼吸与土壤温度和湿度的关系

不同处理间土壤呼吸与土壤温度均为显著线性关系。去除凋落物,土壤温度解释了土壤呼吸变化的比例为:林窗去除(65.84%)、对照(58.54%)、林内去除凋落物(53.04%)、对照(53.56%),其中林窗去除拟合程度最高。林窗、林内去除和保留凋落物处理的土壤呼吸与地下 5cm 处的土壤温度间均达到了显著关系,且线性模型在拟合效果要略好于指数模型,这与前人在其它土地利用类型结论基本一致^[21-23]。林窗、林内去除凋落物拟合分别为:51.96%、41.69%。林窗、林内对照处理的拟合系数分别为 43.43%、40.12%(表 3)。林窗去除凋落物明显上升了土壤温度解释土壤呼吸变化的比例,说明杉木林冠层对于保持土壤呼吸的稳定性有重要作用。

杉木人工林土壤呼吸属低敏感性。林窗对照的 Q_{10} 值>去除凋落物处理的 Q_{10} 值,但差异不显著($P=0.846$),而林内去除凋落物处理和对照的 Q_{10} 值分别为 1.37、1.55,两种处理之间的差异为极显著差异($P=0.003$)。林窗、林内去除凋落物的 Q_{10} 值分别为 1.39、1.37,两种林分之间的差异性不显著($P=0.634$),林窗、林内对照的 Q_{10} 值分别为 1.40、1.55,两种林分之间的差异显著($P=0.010$),所有的处理的 Q_{10} 值均在 1.39—1.55 之间(表 4)。

表 3 土壤呼吸与土壤温度的回归分析(直线回归和指数回归)

Table 3 The regression analysis in soil respiration and soil temperature(Linear and Exponential regression model)

	凋落物处理 Litter Treatment	拟合方程 Fitted Equation	a	b	R ²	F	P
林窗 Gap	去凋(RL)	$y = 0.0713Ts + 0.4448$	0.4448	0.0713	0.6584	19.2779	0.0014
	对照(CK)	$y = 0.0735Ts + 0.7944$	0.7944	0.0735	0.5854	14.122	0.0037
林内 Forest	去凋(RL)	$y = 0.0422Ts + 0.7707$	0.7707	0.0422	0.5304	11.2955	0.0072
	对照(CK)	$y = 0.0571Ts + 0.8456$	0.8456	0.0571	0.5356	11.5333	0.0068
林窗 Gap	去凋(RL)	$y = 0.9011e^{0.0321Ts}$	0.9011	0.0321	0.5196	10.815	0.0321
	对照(CK)	$y = 1.1758e^{0.0285Ts}$	1.1758	0.0285	0.4343	7.6781	0.0198
林内 Forest	去凋(RL)	$y = 0.9434e^{0.0237Ts}$	0.9434	0.0237	0.4169	7.1499	0.0233
	对照(CK)	$y = 1.00046e^{0.0257Ts}$	1.00046	0.0257	0.4012	6.6993	0.027

表 4 杉木人工林林窗内外土壤 Q_{10} 值

Table 4 The Q_{10} values in/out of the gaps in Chinese Fir plantation

	凋落物处理 Litter Treatment	Q_{10}	R ²	F	P
林窗 Gap	去凋(EL)	1.3924 ± 0.0141	0.3564	5.5384	0.0404
	对照(CK)	1.4049 ± 0.0134	0.3912	6.4261	0.0296
林内 Forest	去凋(EL)	1.3703 ± 0.0115	0.4299	7.5411	0.0315
	对照(CK)	1.5496 ± 0.0118	0.581	13.6842	0.0438

双因素关系模型能够很好的解释双因子(土壤温湿度)的影响程度。采用双因素关系模型拟合土壤温度、湿度与土壤呼吸速率关系发现林窗去除凋落物与对照处理的双因素拟合程度分别为 77.28%、68.63%,林

内为 69.53%、73.80%(表 5)。温度和湿度共同解释土壤呼吸在 68.63%—77.28%之间。林窗去除凋落物处理的拟合系数高于对照处理,林内则表现出相反的趋势。由此,可见在杉木人工林中,土壤温度和水分对土壤呼吸仍起主导作用,但森林土壤温度和湿度的影响力要弱于草地等^[21],主要原因极可能是森林特别是杉木林的高郁闭度,增加了林分垂直方向的复杂性,削弱了环境对土壤直接影响力。外界土壤的温度和湿度会直接影响到土壤中根系的活性和呼吸速率以及土壤表层凋落物的分解和地底微生物、酶等的活性^[31-33],这些均直接或间接地影响到林分内土壤呼吸值的大小。

表 5 土壤呼吸与土壤温度(T)和土壤湿度(W)的多元回归方程
Table 5 Results of regression in common among soil respiration and soil temperature and soil moisture

凋落物处理 Litter Treatment		多元回归方程	F	R ²	P
林窗 Gap	去凋(RL)	$Y = -0.0510 + 0.0385T_s + 0.0630W$	15.3040	0.7728	0.001
	对照(CK)	$Y = 0.1290 + 0.0499T_s + 0.0625W$	13.0344	0.6863	0.002
林内 Forest	去凋(RL)	$Y = 0.3001 + 0.0370T_s + 0.0343W$	13.5512	0.6953	0.002
	对照(CK)	$Y = 0.2329 + 0.06118T_s + 0.0375W$	16.4954	0.7380	0.001

5 小结

温度和湿度是杉木人工林土壤呼吸的主要影响因子。林窗、林内 5cm 深度土壤温度表现为夏季温度高、冬季温度低,基本上也呈现出单峰曲线。林窗、林内土壤湿度的季节变化高低交替型,波动较大,没有显著的规律性,这主要与福建降水量季节变率较大有关,还与土壤的下渗能力、土壤蒸发与植物的蒸腾作用、冠层的郁闭度等有关。两种林分土壤含水量差异不显著。虽然保留比去除凋落物层后杉木人工林有更高的土壤湿度,但二者的差异并未达到显著水平,表明凋落物层在一定程度上阻挡降水冲击土表并减缓土壤水分的散失,但也有可能是杉木人工林凋落物厚度不足,不易分解保湿性弱,对土壤湿度影响力有限。林窗去除凋落物和对照的土壤湿度与土壤呼吸的拟合程度高于林内的两种处理且线性模型的拟合效果较好。

凋落物和林窗是森林土壤呼吸的重要影响因素。去除和保留凋落物处理下杉木人工林林窗和林内土壤呼吸速率月动态上均表现出相似的单峰曲线,但凋落物对杉木林土壤呼吸的影响不容忽视,去除凋落后杉木人工林土壤呼吸在生长季呈显著下降,非生长季也有不同程度下降,同时凋落物的这种作用效应在温度变化不大的月份作用有一定的滞后性,本质上应该是对土壤温度的间接影响的结果。凋落物是森林生态系统物质循环和能量流动的重要环节,同时还是调节森林内部微环境的影响因子,因此,凋落物在土壤呼吸过程中的量化研究也是为森林碳循环提供一定的参考。林窗是森林生态系统重要的研究对象,林窗改变了林内的光照、温度和湿度等环境因子,直接或间接地影响到土壤呼吸的规律,杉木人工林中林窗内外土壤呼吸的定量研究有助于精确测量森林生态系统的碳通量,减少误差,同时林窗的形成原因多样,人工林林窗也为与天然林等林分类型林窗内土壤碳通量的比较研究打下基础。

本研究虽然对杉木人工林在去除/保留凋落物的背景下土壤呼吸作了探讨,但结果仍需进一步研究完善,如不同年龄或不同生长阶段的杉木人工林是否存在类似规律,杉木人工林土壤呼吸来自植物根系和非根系是否等比例,林窗的发育阶段对森木土壤呼吸的影响等均不得而知,这些须在今后的研究中进一步探索。

参考文献(References):

[1] 杨玉盛, 陈光水, 董彬, 王小国, 谢锦升, 李灵, 卢豪良. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. 生态学报, 2004, 24(5): 953-958

[2] Wang W, Fang J. Soil respiration and human effects on global grasslands. Global and Planetary Change, 2009, 67(1):20-28

[3] Zhou L Y, Zhou X H, Shao J J, Nie Y Y, He Y H, Jiang L L, Wu Z T, Bai S H. Interactive effects of global change factors on soil respiration and its components: a meta-analysis. Global Change Biology, 2016, 22(9):3157-3169

- [4] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环. 地学前缘, 2002, 9(2):351-357
- [5] Gong J R, Ge Z W, An R, Duan Q W, You X, Huang Y M. Soil respiration in poplar plantations in northern China at different forest ages. *Plant and Soil*, 2012, 360(1):109-122
- [6] 杨智杰, 陈光水, 谢锦升, 杨玉盛. 杉木、木荷纯林及其混交林凋落物量和碳归还量. 应用生态学报, 2010, 21(9):2235-2240
- [7] 王国兵, 唐燕飞, 阮宏华, 施政, 何容, 王莹, 蔺菲, 苏广鑫. 次生栎林与火炬松人工林土壤呼吸的季节变异及其主要影响因子. 生态学报, 2009, 29(2):966-975
- [8] ArchMiller A A, Samuelson L J, Li, Y R. Spatial variability of soil respiration in a 64-year-old longleaf pine forest. *Plant and Soil*, 2016, 403(1):419-435
- [9] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. 生态学报, 1997, 17(5):469-476
- [10] Zeeman M J, Hiller R, Gilgen A K, Michna P, Plüssa P, Buchmann N, Eugster W. Management and climate impacts on net CO₂ fluxes and carbon budgets of three grasslands along an elevational gradient in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4):519-530
- [11] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 谢锦升, 高人, 李震, 金钊. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响. 生态学报, 2005, 25(7):1684-1690
- [12] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 董云社, 王智平, 熊小刚, 阎志丹. 土壤呼吸对温度升高的适应. 生态学报, 2004, 24(11):2649-2655
- [13] 陈光水, 杨玉盛, 吕萍萍, 张亿萍, 钱小兰. 中国森林土壤呼吸模式. 生态学报, 2008, 28(4):1748-1761
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤呼吸组分的分离量化. 生态学报, 2006, 26(6):1640-1647
- [17] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 谢锦升, 董彬, 李震, 高人. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响. 土壤学报, 2005, 42(4):584-590
- [18] 王兵, 姜艳, 郭浩, 赵广东, 白秀兰. 土壤呼吸及其三个生物学过程研究. 土壤通报, 2011, 42(2):483-490
- [19] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 陈光水, 高人, 李灵, 王小国, 郭剑芬. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应. 生态学报, 2004, 24(3):583-591
- [20] 肖复明, 汪思龙, 杜天真, 于小军, 陈龙池. 杉木人工林林地土壤呼吸研究. 江西农业大学学报, 2005, 27(4):580-584
- [21] 李希菲, 王明亮. 杉木种源对立地指数模型的影响. 林业科学研究, 2000, 13(6):641-645
- [22] 达良俊, 杨永川, 宋永昌. 浙江天童国家森林公园常绿阔叶林主要组成种的种群结构及更新类型. 植物生态学报, 2004, 28(3):376-384
- [23] 王光军, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 李树战. 马尾松林土壤呼吸对去除和添加凋落物处理的响应. 林业科学, 2009, 45(1):27-30
- [24] 王光军, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 项文化, 梁小翠. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响. 植物生态学报, 2009, 33(4):739-747
- [25] 王小国, 朱波, 王艳强, 郑循华. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性. 生态学报, 2007, 27(5):1960-1968
- [26] Fang C M, Smith P, Moncrieff J B, Smith J U. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature*, 2005, 433(7021):57-59
- [27] 盛浩, 杨玉盛, 陈光水, 高人, 曾宏达, 杜紫贤, 张静. 土壤异养呼吸温度敏感性(Q₁₀)的影响因子. 亚热带资源与环境学报, 2006, 1(3):74-83
- [28] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环. 地学前缘, 2002, 9(2):351-357
- [29] 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
- [30] 王森, 姬兰柱, 李秋荣, 刘延秋. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 2003, 14(8):1234-1238
- [31] 徐振锋, 唐正, 万川, 熊沛, 曹刚, 刘庆. 模拟增温对川西亚高山两类针叶林土壤酶活性的影响. 应用生态学报, 2010, 21(11):2727-2733
- [32] 程冬冬, 赵贵哲, 刘亚青, 郝率群. 土壤温度、土壤含水量对高分子缓释肥养分释放及土壤酶活性的影响. 水土保持学报, 2013, 27(6):216-220+225
- [33] 王西洋, 马履一, 贾忠奎, 刘杰, 游伟斌, 张田田. 森林经营措施对土壤呼吸的影响机理. 世界林业研究, 2012, 25(1):7-12