

DOI: 10.5846/stxb202111053107

时应贵, 林伟盛, 胥超, 刘小飞, 陈仕东, 熊德成, 杨智杰. 火烧强度对中亚热带人工造林初期土壤呼吸的影响. 生态学报, 2022, 42(19): 8094-8104.
Shi Y G, Lin W S, Xu C, Liu X F, Chen S D, Xiong D C, Yang Z J. Effect of fire intensity on soil respiration in the early stage of afforestation in mid-subtropic. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 8094-8104.

火烧强度对中亚热带人工造林初期土壤呼吸的影响

时应贵^{1,2}, 林伟盛^{1,2}, 胥超^{1,2}, 刘小飞^{1,2}, 陈仕东^{1,2}, 熊德成^{1,2}, 杨智杰^{1,2,*}

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站, 三明 365000

摘要:在热带和亚热带森林中, 火烧是一种清理采伐迹地的有效管理措施。尽管许多研究表明, 火烧刺激了土壤的碳排放, 但对亚热带火强度对土壤呼吸的影响还缺乏了解。在中亚热带米槠常绿阔叶次生林采伐迹地上, 设置高火烧强度(HF)、低火烧强度(LF)炼山造林处理, 利用 LI-8100 对造林初期(2012 年 3 月—2012 年 12 月)土壤呼吸进行测定, 同时监测观测期土壤温度、含水量以及降雨量等气象因子, 分析不同火烧强度对中亚热带造林初期土壤呼吸及排放量的影响, 同时探讨影响土壤呼吸变化的主要因素。结果表明: (1) 观测期间不同火烧强度对土壤呼吸的影响呈现出明显的时间变化特征: 与对照(CT)相比, 土壤呼吸在火烧后 2 个月以内显著增加($P < 0.05$), HF 和 LF 分别增加 76.3% 和 55.3%; 在火烧后 2—5 个月内三种处理间没有显著差异($P > 0.05$); 但之后, 火烧处理土壤呼吸显著低于 CT($P < 0.05$), HF 和 LF 分别降低 40% 和 32.6%; 在观测期间火烧处理没有导致土壤 CO₂ 累计排放量的增加。(2) 火烧处理下, 仅 HF 处理中土壤呼吸与土壤温度显著相关($P < 0.05$), 但拟合决定系数较低。(3) 单次降水事件会导致火烧处理下土壤呼吸的增加, 而对照无明显增加; 但连续性降水事件中, 降雨早期促进土壤呼吸, 而后期呈现出抑制作用。

关键词: 中亚热带; 火烧强度; 人工林; 土壤呼吸; 降水

Effect of fire intensity on soil respiration in the early stage of afforestation in mid-subtropic

SHI Yinggui^{1,2}, LIN Weisheng^{1,2}, XU Chao^{1,2}, LIU Xiaofei^{1,2}, CHEN Shidong^{1,2}, XIONG Decheng^{1,2}, YANG Zhijie^{1,2,*}

1 School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Fujian Sanming Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Sanming 365000, China

Abstract: Slash burning is an effective management to clean plant residue before seedling plant in tropical and subtropical forests. Although many studies have been showed that slash burning stimulated carbon emission from soil, there still lack understanding on how fire intensities on soil respiration in subtropics. In this study, clear cutting an evergreen broad-leaved secondary forest dominated by *Castanopsis carlesii* and leaving the plant residue on the surface soil before slash burning are used. The High fire intensity (HF) and low fire intensity (LF) treatments were set up after slash burning. Soil respiration was measured by LI-8100 at the early stage of the tree plantation (from March to December, 2012), and soil temperature, soil water content and rainfall were surveyed simultaneously. The results show that: (1) slash burning stimulated soil respiration but highly temporal variation with times. Compared with the control (CT), soil respiration in HF and LF increased by 76.3% and 55.3% in the first two months after slash burning ($P < 0.05$), respectively. However, there were no significant differences among treatments from 2nd—5th months after slash burning ($P > 0.05$). Then, slash burning

基金项目: 国家自然科学基金(31670623); 国家自然科学基金重点项目(31130013)

收稿日期: 2021-11-05; 采用日期: 2021-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhijieyang@fjnu.edu.cn

decreased soil respiration after the 5th month ($P < 0.05$), while HF and LF decreased by 40% and 32.6% to CT, respectively. Thus, slash burning did not stimulated the sum of soil CO_2 emission during the observation period. (2) soil respiration was significantly correlated with soil temperature in the HF treatment ($P < 0.05$) with low fitting determination. However, no significant correlation between soil respiration and soil temperature was found in other treatments. (3) A single precipitation event stimulated soil respiration rate in both HF and LF, but not in the CT. We also found that rainfall promoted soil respiration in the early time and inhibited soil respiration in the late time during the continuous precipitation.

Key Words: mid-subtropic; fire intensity; tree plantation; soil respiration; precipitation

人工林在我国森林生态系统占据重要作用,面积达到 6933 万 hm^2 ,占世界人工林总面积的 26.2%,居各国之首^[1],在我国“森林碳汇”中占据重要作用。在我国南方,火烧已经成为人工造林中清理采伐迹地最经济的方式^[2],但这种传统人工造林方式将加快幼林土壤有机碳分解,增加土壤碳排放,给人工林“碳汇”功能造成极大的影响^[3-5]。因此,深入了解火烧对土壤碳排放的影响,成为研究森林生态系统碳排放的重要组成。

土壤呼吸是陆地生态系统第二大碳通量,在调节土壤碳库与生态系统碳循环中发挥着重要作用^[6-7]。火烧能够快速清除造林过程中的采伐剩余物及灌木杂树^[8],但火烧过程产生的大量黑色残余物(灰分、木碳等)及养分,影响土壤温度、土壤含水量及土壤养分等环境因子^[9-13],直接改变土壤微生物的群落结构和活性,刺激土壤微生物生长等,影响土壤呼吸^[14-17]。由于采伐剩余物的数量与质量的差别,产生不同的火烧强度与土壤呼吸,导致目前有关火烧强度对土壤呼吸的影响还未有较为明确的结论^[18]。同时造林初期植被稀疏较幼小,对环境变化的响应十分敏感,增加了森林土壤碳排放量精确评估的难度^[19-20]。

中国的亚热带是全球生产力最高的地方之一,是中国最重要的人工林区域^[21],火烧是传统人工造林最常用营林方式^[2,22],同时该地区气候特殊,春季夏季降雨频繁,占年降水量的 60%以上^[22-23],将导致严重的水土流失^[24-25];这些人为和自然因素的结合将改变土壤通气情况^[26]、呼吸的底物有效性^[27]、以及土壤微生物与植物根系的生理活性^[28-29],影响土壤呼吸^[30];尤其短期降水的不确定^[31-32]加剧了亚热带森林土壤呼吸的变异,增加了对森林生态系统碳排放精确评估的难度。

本研究通过高频观测中亚热带常绿阔叶米槠次生林皆伐后,炼山造林初期土壤呼吸与土壤温度、含水量及降水的动态变化,分析不同火烧强度对中亚热带人工造林初期阶段碳循环的影响,以期能够为我国人工造林中使用火烧方式提供科学依据,并为精确评估森林碳排放提供一定的基础数据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验样地位于福建三明森林生态系统与全球变化国家野外科学观测研究站-陈大观测点($26^{\circ}19' \text{ N}$, $117^{\circ}36' \text{ E}$),平均海拔 330 m,以低山丘陵为主,属中亚热带季风气候,年均降水量 1749 mm,年均气温 19.1°C ,土壤为黑云母花岗岩发育的红壤,土层厚度超过 1 m。皆伐前林分为 1978 年经强度择伐后人促更新的米槠次生林,林分密度为 2650 株/ hm^2 ,平均树高 19.7 m,平均胸径 13.5 cm。主要树种为米槠(*Castanopsis carlesii*)、闽粤栲(*Castanopsis fissa* Rehd)、木荷(*Schima superba*)等,以米槠为优势树种。林下植被主要有毛冬青(*Ilex pubescens* Hook)、狗骨柴(*Tricalysia dubia*)、矩圆叶鼠刺(*Itea chinensis*)、沿海紫金牛(*Ardisia punctata*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)等^[33]。该林分 0—80 cm 土壤有机碳储量 $85.34 \text{ t}/\text{hm}^2$,年均凋落物量 $5.81 \text{ t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$;年平均气温为 20.1°C ,年平均降雨量为 1670 mm,1959 年至 2006 年间测量,约 80% 的降雨量发生在 3 月至 8 月之间;同时研究区人工造林中,多使用人工控制火烧炼山的方式(火烧清理采伐剩余物),但由于凋落物含量较多,炼山面积较大,不慎时可能发生大面积森林火灾。观测期间样地气温最高出现在 7、8 两月(图 1);4—12 月总降水量 1472.4 mm,主要集中在 4 月(269.8 mm)、6 月(292.4 mm)和 11 月(281 mm)。

1.2 样地设置

2011 年 11 月在米楮天然更新次生林(总面积为 17.1 hm²)通过随机区组设计布设 12 块 5 m×20 m 地表径流收集固定场(P1-P12),其中 P1—P9 为拟皆伐地, P10-P12 为保留对照样地(CT)^[25]。2011 年 12 月对 P1-P9 进行皆伐,移除主要树干部分后将采伐剩余物均匀覆盖地表。经过三个月的太阳曝晒,于 2012 年 3 月 28 日对 P3—P8 样地的采伐剩余物进行火烧。由于破位差异对森林生产力的影响,上坡位的林分生产力低于下坡位,使得采伐剩余物在不同坡位产生明显的自然差异。上坡采伐剩余物数量低于下坡,火后下坡位的土壤表层上灰炆明显高于上坡位,产生不同火烧强度。其中 P3、P5、P6 处于中上坡位,火烧过程中火烧强度较低(LF),而 P4、P7、P8 火烧过程中火烧强度较高(HF)。坡向都为东偏南,坡度都在 29°—35°。

1.3 测定项目与方法

土壤呼吸测定:利用腔室法进行土壤呼吸测定,在每个标准样地步骤 5 个 PVC 呼吸圈,呼吸圈单个内径 20 cm 高度为 10 cm,将 PVC 一端削尖插入土壤 3—5 cm,采用 Li-8100 进行土壤呼吸速率观测。土壤呼吸的测定时间:2012 年 3 月 28 日起至 6 月 1 日,每天测量一次,到 6 月 1 日后选择在 6 月 8、10、19 和 30 日各测定一次,而从 7 月到 12 月间,于每月的中旬(15 日左右)及月底(30 日左右)各选择一天测量,每次测定的时间均选择在上午 9:00—11:00,观测持续 10 个月。

土壤温度与含水量测定:在土壤 10 cm 深处安装 ECH₂O(Model EC-5, Decagon 公司,英国)温度和水分探头,连续测量土壤含水量和温度。

大气温度及降水量的测定:通过前期安装的自动小型气象站进行观测。

1.4 数据处理

对所用数据均进行前处理,并通过正态分布检验和 *F* 检验,剔除异常值。通过 ANOVA 方差分析并使用 *q* 检验进行多重比较,分析不同火烧强度下土壤呼吸速率的差异显著性。通过指数模型与线性模型分别对土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量进行拟合,公式如下:

土壤呼吸与土壤温度采用指数模型拟合:

$$R = a \times e^{bT} \quad (1)$$

其中,*R* 为土壤呼吸速率, *a*、*b* 为参数, *T* 为土壤温度。土壤呼吸与土壤含水量采用线性模型拟合:

$$R = a \times W + b \quad (2)$$

式中,*R* 为土壤呼吸速率, *a*、*b* 为参数, *W* 为土壤含水量^[34]。使用 SPSS 19.0 和 Origin 2021 软件进行数据处理及图形绘制。图表中数据为均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同火烧强度对土壤温度、含水量的影响

火烧的第一个月内(3 月 28 日—4 月 19 日期间),高(HF)与低(LF)火烧强度处理中土壤平均温度分别是 20.45 °C 和 22.89 °C,比对照(CT)高 4.08 °C 和 6.53 °C;且该时期土壤温度波动剧烈, HF、LF 和 CT 样地土壤温度变化幅度(最大值与最小值之差除以平均值)分别是 69.6%、87.5% 和 34.4%。在 4 月 19 日—6 月 19 日期间,3 个处理之间土壤温度差异减少, CT、HF 与 LF 样地土壤平均温度分别是 21.38 °C、22.77 °C 和

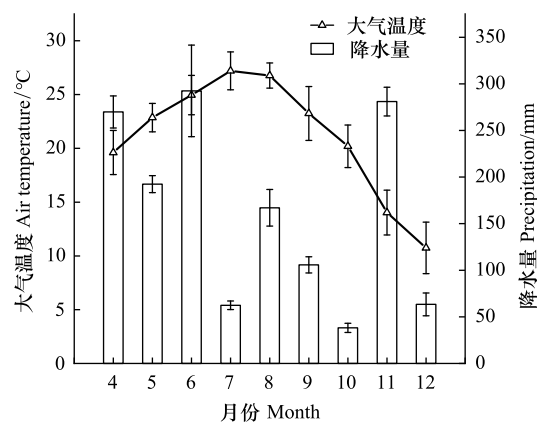


图 1 观测期间大气温度与降水量

Fig.1 Air temperature and precipitation during the observation period

21.49 ℃。但在 6 月 19 日之后, HF 与 LF 样地土壤平均温度分别是 22.29 ℃ 和 25.53 ℃, 比 CT 样地高 1.92 ℃ 和 5.15 ℃; 且该时期土壤温度波动剧烈, HF、LF 及 CT 样地土壤温度波动幅度分别为 65.2%、78.9% 及 61.5% (图 2)。

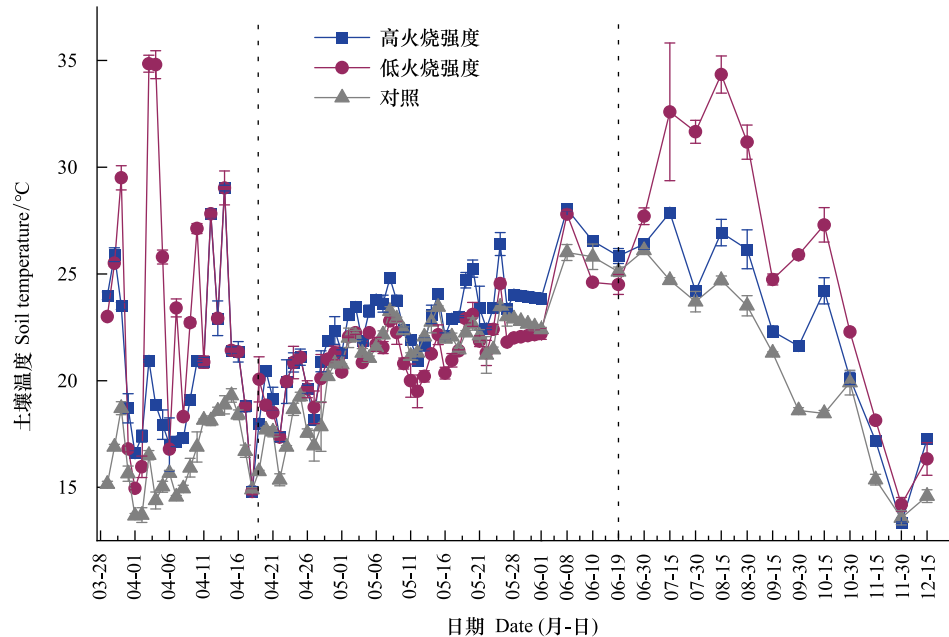


图 2 不同处理下土壤温度的动态变化

Fig.2 Dynamic changes of soil temperature under different treatments

图中虚线表示不同阶段

土壤含水量在火烧后的前期(3 月 28 日—5 月 18 日)略高与对照处理。其中, HF 与 LF 处理平均含水量分别为 26.5% 和 24.5%, 比 CT 分别高 4.1% 和 2.0%; 且该时期土壤含水量波动剧烈, HF、LF 及 CT 样地土壤含水量变化幅度分别为 100.5%、70.8% 及 97.3%。5 月 18 日—7 月 15 日期间, CT 土壤平均含水量 21.0%, 比 LF 与 HF 处理平均含水量分别高 0.8% 及 3.8%。在 7 月 15 日—9 月 30 日, HF 与 LF 处理平均含水量分别为 21.2% 和 18.4%, 比 CT 高 6.3% 和 3.6%。在 9 月 30 日之后, HF 和 LF 处理平均含水量分别为 18.2% 和 21.4%, 比 CT 高 2.7% 和 5.8% (图 3)。

2.2 不同火烧强度下土壤呼吸的动态变化

火烧对土壤呼吸速率表现出明显的时间差异(图 4)。在 T1 阶段(3 月 28 日—5 月 18 日), 火烧显著增加了土壤呼吸速率($P < 0.05$), 其中在 T1a 阶段(3 月 28 日—4 月 18 日), HF、LF 和 CT 土壤呼吸速率分别为 $(4.35 \pm 0.75) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $(3.60 \pm 0.69) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $(2.36 \pm 0.23) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; 火烧后 T1b 阶段(4 月 18 日—5 月 18 日), HF 与 LF 处理无显著差异($P > 0.05$), 但都显著高于 CT 处理($P < 0.05$), 土壤呼吸速率分别为 $(4.54 \pm 1.15) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $(4.17 \pm 0.95) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 及 $(2.66 \pm 0.72) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。而在 T2 阶段(5 月 18 日—8 月 15 日), 对照处理高于火烧处理, 但未有显著差异($P > 0.05$)。T3 阶段(8 月 15 日之后), 对照处理显著高于火烧处理($P < 0.05$), 火烧处理之间无显著差异($P > 0.05$), HF、LF 和 CT 土壤呼吸速率分别为 $(2.34 \pm 0.45) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $(2.63 \pm 0.56) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 及 $(3.90 \pm 0.34) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (图 4)。

火烧对土壤呼吸累计排放量也表现出明显的时间差异(图 5)。在 T1 阶段(3 月 28 日—5 月 18 日), 火烧处理显著高于对照($P < 0.05$), 而两个火烧强度处理之间无显著差异($P > 0.05$), 三个处理土壤 CO_2 累计排放量分别为 $(845.50 \pm 192.39) \text{g/m}^2$ 、 $(747.47 \pm 160.19) \text{g/m}^2$ 及 $(482.12 \pm 92.26) \text{g/m}^2$, 其中在 T1a 阶段(3 月 28 日—4 月 18 日)火烧处理之间无显著差异($P > 0.05$), 但都显著高于 CT ($P < 0.05$), 三个处理土壤 CO_2 累计排放量

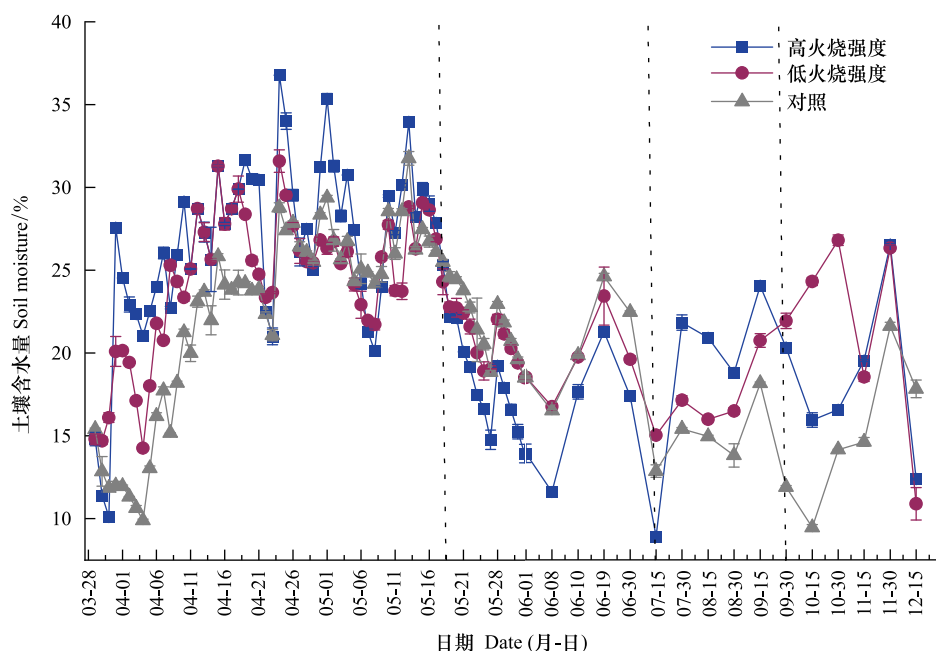


图3 不同处理下土壤含水量的动态变化

Fig.3 Dynamic changes of soil moisture content under different treatments

分别为 $(363.76 \pm 66.14) \text{ g/m}^2$ 、 $(301.18 \pm 58.97) \text{ g/m}^2$ 及 $(197.10 \pm 19.42) \text{ g/m}^2$;火烧后 T1b 阶段(4 月 18 日—5 月 18 日),火烧处理土壤 CO_2 累计排放量高于对照处理,且火烧强度越高土壤 CO_2 累计排放量越高,同时三个处理无显著差异($P > 0.05$),HF、LF 和 CT 土壤 CO_2 累计排放量分别为 $(518.12 \pm 135.26) \text{ g/m}^2$ 、 $(475.24 \pm 108.30) \text{ g/m}^2$ 及 $(303.81 \pm 78.82) \text{ g/m}^2$;火烧后 T2 时期,各处理均无显著差异($P > 0.05$),三个处理土壤 CO_2 累计排放量分别为 $(1443.18 \pm 300.71) \text{ g/m}^2$ 、 $(1501.29 \pm 366.78) \text{ g/m}^2$ 及 $(1644.57 \pm 249.86) \text{ g/m}^2$;火烧后 T3 时期,CT 显著高于其它处理,且 HF 与 LF 处理无显著差异,三个处理土壤 CO_2 累计排放量分别为 $(955.05 \pm 195.03) \text{ g/m}^2$ 、 $(1083.96 \pm 250.13) \text{ g/m}^2$ 及 $(1619.22 \pm 182.56) \text{ g/m}^2$;整个观测期间土壤 CO_2 累计排放量未有显著差异($P > 0.05$),三个处理土壤 CO_2 累计排放量分别为 $(4125.62 \pm 893.64) \text{ g/m}^2$ 、 $(4109.15 \pm 914.74) \text{ g/m}^2$ 及 $(4246.82 \pm 691.37) \text{ g/m}^2$ 。

2.3 不同火烧强度下土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量的关系

HF 处理下仅在 T1b、T1、T3 时期,土壤呼吸与土壤温度呈显著的指数相关($P < 0.01$),其中仅在 T3 时期决定系数(R^2)达到 0.882,而其它时期时 R^2 较低。LF 处理下仅在 T3 时期,土壤呼吸与土壤温度呈显著的指数相关($P < 0.01$, $R^2 = 0.797$),而其它时期均呈无相关($P > 0.05$),同时土壤呼吸与土壤含水量均无显著的线性关系($P > 0.05$)。CT 处理仅在 T3 时期,土壤呼吸与土壤温度未呈显著的指数相关($P > 0.05$),但在其它时期均呈显著或极显著相关,但 R^2 最大为 0.435;同时此处理下土壤呼吸与土壤含水量仅在 T1a、T1 时期呈显著的线性关系($P < 0.01$) (表 1)。

2.4 不同火烧强度下降水对土壤呼吸的影响

降水能够影响土壤呼吸,甚至可以控制土壤呼吸。降水对土壤呼吸的影响有所差异,如 4 月 6 日、8 日土壤呼吸增加,其中 4 月 6 日降雨后 HF 样地土壤呼吸增加了 13.4%,LF 样地土壤呼吸增加了 5.7%,CT 样地土壤呼吸增加了 7.5%;4 月 8 日降雨后 HF 样地土壤呼吸增加了 116.6%,LF 样地土壤呼吸增加了 44.9%,CT 样地土壤呼吸增加了 17.2%。不同处理下土壤呼吸对连续降水响应有所不同:4 月 14 日—4 月 17 日,降水导致土壤呼吸持续降低,其中 HF、LF 和 CT 变化幅度分别为 62.8%、48.3%和 19.6%;4 月 23 日—4 月 26 日,降水导致火烧处理土壤呼吸先增后减,但对照呈上升趋势,其中 HF、LF 和 CT 变化幅度分别为 62.9%、51.1%和

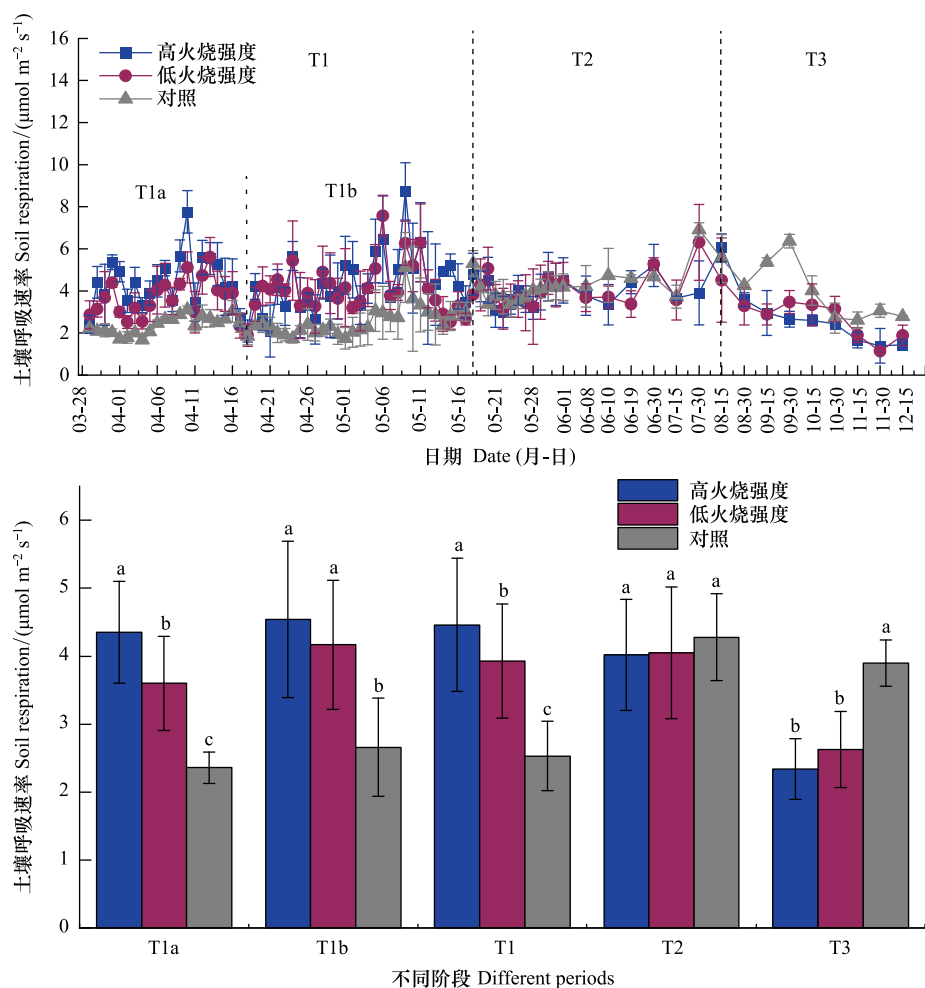
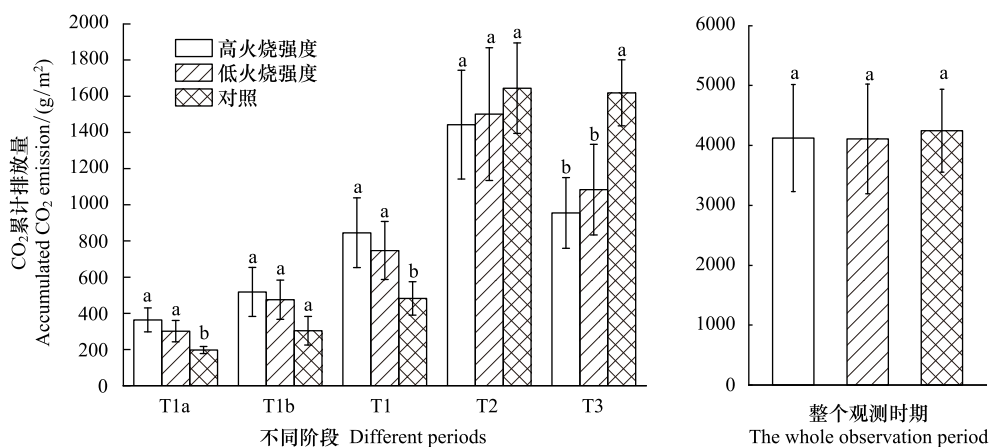


图 4 不同处理下土壤呼吸速率的动态变化

Fig.4 Dynamic changes of soil respiration under different treatments

图中竖线表示不同阶段;T1:3月28日—5月18日;T1a:3月28日—4月18日;T1b:4月18日—5月18日;T2:5月18日—8月15日;T3:8月15日—;不同小写字母代表同一阶段不同处理显著差异

图 5 不同处理下不同阶段 CO_2 累计排放量Fig.5 Accumulative CO_2 emissions in different periods under different treatments

32.8%;4月28日—5月4日,降水导致不同火烧强度土壤呼吸呈现不同模式,HF处理土壤呼吸呈先增后减趋势,LF处理其土壤呼吸呈先减后增趋势,CT处理土壤呼吸也呈先减后增趋势,其中HF、LF和CT变化幅度分别为44.7%、42.5%和27.5%;5月8日—5月24日,降水导致不同火烧强度土壤呼吸呈现不同趋势,HF处理土壤呼吸呈先增后减,LF处理土壤呼吸呈先增后减在增的趋势,CT处理其土壤呼吸呈先增再减在增再减在增的趋势,其中HF、LF和CT变化幅度分别为124.2%、93.9%和85.1%;总体来看连续性降水前期促进土壤呼吸,之后渐变为抑制土壤呼吸(图6)。

表 1 土壤呼吸速率(*R*)与土壤温度(*T*)与土壤含水率(*W*)不同模型拟合的参数

Table 1 Parameters of different models fitting soil respiration (<i>R</i>) and soil temperature (<i>T</i>) and soil moisture content (<i>W</i>)							
不同时期 Different periods	处理 Treatment	$R=a\times e^{bT}$			$R=a\times W+b$		
		a	b	R^2	a	b	R^2
T1a(03-28—04-18)	HF	2.557	0.024	0.085	0.05	2.843	0.075
	LF	2.801	0.009	0.043	0.039	2.705	0.048
	CT	0.875	0.059	0.327**	0.054	1.390	0.487**
T1b(04-18—05-18)	HF	0.963	0.07	0.269**	-0.023	5.187	0.006
	LF	4.545	-0.006	0.001	-0.147	7.996	0.093
	CT	0.773	0.059	0.258**	-0.015	3.045	0.001
T1(03-28—05-18)	HF	1.988	0.036	0.140**	0.029	3.665	0.015
	LF	3.589	0.003	0.002	0.026	3.293	0.01
	CT	1.094	0.043	0.265**	0.039	1.65	0.095**
T2(05-18—08-15)	HF	1.640	0.035	0.102*	0.061	2.92	0.076
	LF	3.212	0.009	0.036	-0.043	4.936	0.015
	CT	1.130	0.056	0.239*	-0.114	6.654	0.221
T3(08-15—)	HF	0.452	0.079	0.881**	0.485	2.249	0.001
	LF	0.631	0.061	0.797**	0.022	2.175	0.018
	CT	1.388	0.054	0.305	-0.108	5.543	0.091

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

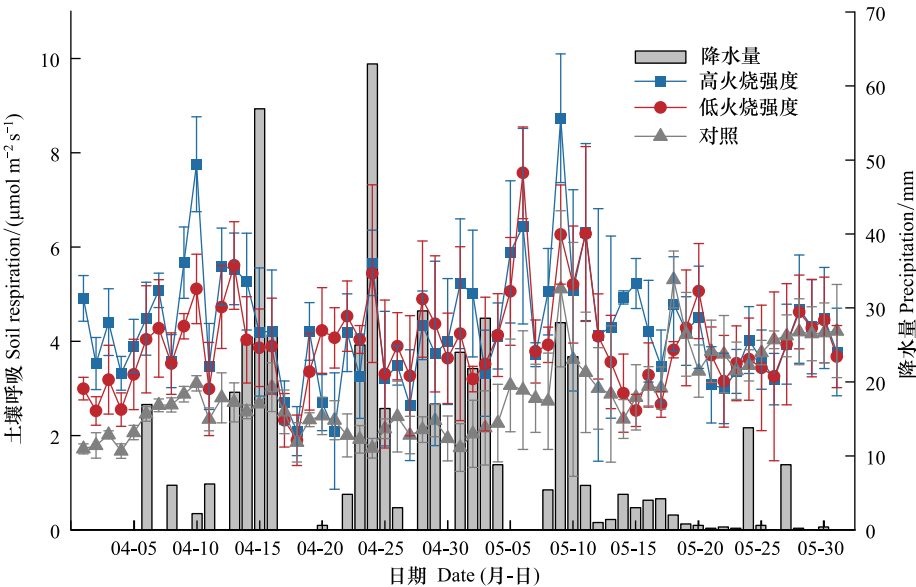


图 6 不同处理及降水下土壤呼吸的变化

Fig.6 Changes of soil respiration under different treatments and precipitation

3 讨论

3.1 火烧强度对人工造林初期土壤呼吸的影响

本研究表明不同火烧强度对人工林造林初期土壤呼吸具有明显的阶段性特征。由于前期火烧导致大量养分灰烬进入土壤,为微生物活动提供了丰富的能量与养分,促进了土壤异养呼吸^[35]。但随着养分的损耗及水土流失,火烧处理与对照土壤呼吸差异减小,最后火烧处理土壤呼吸小于对照处理。其中火烧处理后的前 2 个月显著增加了土壤呼吸(图 4),其中高火烧和低火烧强度处理分别比对照高 76.3%和 55.3%,这与一些研究结果相同^[5,36—38],李震^[39]对皆伐炼山处理对杉木林地土壤呼吸的影响研究表明,火烧后前 2 个月内火烧样地的土壤呼吸比对照 35.2%。这可能与火烧导致植物细根死亡,以及火烧后植物灰烬中丰富的养分,为微生物活动提供了丰富的能量,且火烧处理下的黑色物质(灰分、木碳等)能够吸收更多的太阳辐射,提高土壤温度(图 2),同时大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 K^{+} 等阳离子,导致土壤中 pH 值上升^[11,40—41],这些均有利于增加微生物活动与呼吸^[42]。如火烧强度高的样地中,有着较多的灰烬养分以及细根的死亡^[39],导致火烧刚结束的一段时间里高火烧强度处理土壤呼吸速率高于低火烧强度处理;而在火烧后约 1—2 个月,随着灰烬养分的利用与淋溶,土壤死亡根系的利用,不同火烧强度处理间的土壤呼吸速率差异逐渐减少(图 4)。火烧后 2—5 月高火烧强度处理与低火烧强度处理无显著差异,主要由于高火烧强度灰烬养分由于降水淋溶损失,同时前期高火烧强度处理土壤呼吸损耗,导致其与低火烧强度处理无显著差异。火烧 5 个月之后,高火烧强度处理与低火烧强度处理土壤呼吸都较低,且无显著差异,这是由于高火烧强度处理与低火烧强度处理新种幼苗较小,未能向土壤输入凋落物、根系分泌物等新鲜碳源,且前期燃烧灰烬的流失,导致两种处理间土壤有效性碳大量损失,因此,两者土壤呼吸较低且无显著差异^[11,43]。

Wang 等^[20]对全球 139 处森林火灾后的土壤呼吸进行 Meta 分析表明:火烧总体上土壤呼吸减少 13.5%,其中野火后减少 14.9%,控制火减少 7.5%,主要由于火烧导致前期土壤 C、N 可用性提高,促进微生物活动,但后期土壤养分输入减少,降低了土壤 C 的固存率。本研究中,虽然在观测后期火烧土壤呼吸显著低于对照,但观测前期火烧土壤呼吸显著高于对照(图 4),因此观测期土壤累计 CO_2 排放无显著差异(图 5),这与 Bai 等^[44]研究火烧后土壤呼吸减少 26.8%结果不一致,但主要由于呼吸组成及观测时间上的差异,如土壤呼吸由自养呼吸与异养呼吸组成,一般来说自然的森林生态系统中微生物呼吸占土壤呼吸的 50%^[45—47],而火烧处理后人工林造林早期由于幼苗较小,根系生长还未发达,其土壤呼吸主要由异养呼吸组成。且对照处理中植物光合产物的地下碳分配^[48—49]、凋落物^[50—52]是土壤微生物的主要碳源,而火烧处理中土壤微生物的碳源主要来自于土壤有机碳的分解^[22],因此皆伐火烧后人工造林初期土壤累积 CO_2 排放无显著差异,但由于土壤微生物碳源的差异将导致土壤有机碳的进一步损失。

3.2 环境因子对土壤呼吸的影响

本研究通过每日土壤呼吸的高频观测,进行指数及线性拟合发现土壤温度和含水量不是亚热带土壤呼吸的主要影响因子,与传统上土壤温度、含水量调控土壤呼吸存在差异^[53]。这与 Janssens 等^[48]研究发现土壤温度不是土壤呼吸的主要影响因子一致,虽然土壤呼吸与土壤温度有较好的指数关系,但其主要由于土壤温度与植物光合具有较好的同步性,从而掩盖了植物生产力的作用,土壤呼吸占到总生产力(GPP)的 55%。Högberg 等^[45]的环割实验也表明植物光合驱动土壤呼吸。Bond-Lamberty 等^[50]通过综述全球 54 个森林土壤呼吸数据发现土壤异养呼吸与温度没有显著关系,而与植物凋落物、细根归还量显著相关。同时 Sheng 等^[4]对亚热带土壤呼吸的研究也表明相同土地类型间土壤呼吸与土壤温度有较好的指数拟合,但是不同土地类型间土壤呼吸年通量与细根和凋落物归还有着较好的线性关系。这可能是由于季节尺度上土壤温度与植物生产力有较好的同步性,土壤温度的季节变化掩盖了植物生产力的变化,同时其指出亚热带地区由于降水量充沛,基本不受土壤含水量限制,与本研究土壤呼吸不受土壤含水量影响结果一致。

本研究中虽然土壤含水量不是影响土壤呼吸的重要因素,但发现降水会直接影响土壤呼吸的变化^[54—58]。

这可能是由于降水导致养分淋溶进入土壤,增加底物有效性,促进了土壤呼吸;降水也可能增加土壤孔隙中的 CO_2 物理扩散(图 6),促进表层土壤 CO_2 排放速率^[27,58-60],如 4 月 8 日降水高强度火烧土壤呼吸增加了 116.6%,低火烧强度增加了 44.9%,对照土壤呼吸增加了 17.2%。同时研究发现连续性降水也会促进土壤呼吸,表现为降雨初期促进呼吸速率,但在后期呈抑制作用,这与 Zhu 等^[61]对降水事件对土壤呼吸影响研究的结果一致,当降水导致土壤含水量达到饱和时持续降雨抑制土壤呼吸。同时,本研究发现火烧处理下土壤呼吸波动幅度高于对照处理,如 4 月 23 日—4 月 26 日高火烧强度、低火烧强度和对照变化幅度分别为 62.9%、51.1%和 32.8%,这可能是由于火烧处理中表层积累了大量的有效性碳与养分,降水增加了底物有效性碳与养分的输入,促进土壤微生物呼吸。而对照处理中由于林冠的截流作用,不仅输入量少,而且林冠穿透雨对林冠与地表枯落物的淋溶向土壤输入的可溶性物质的数量与质量均小于火烧样地。另一方面,热带亚热带地区高分化土壤中,土壤铁铝氧化物对原有土壤有机碳的强烈固定作用,导致土壤有机碳有效性低,土壤微生物以新近输入的植物性碳为主要底物来源^[62]。降水导致的外源碳输入的数量与质量变化导致对照处理中更小的呼吸速率与变化幅度。

4 结论

虽然观测期间火烧处理没有导致土壤 CO_2 累计排放量的增加,但火烧对中亚热带森林土壤呼吸具有明显的时间阶段特征:在火烧后的 2 个月时间内,火烧促进土壤呼吸速率,但这种促进作用随着时间慢慢减弱,在火烧后 2—5 个月内三种处理间没有显著差异;但之后,火烧处理土壤呼吸显著低于对照。火烧强度是影响土壤呼吸的一个重要因素,高火烧强度处理土壤呼吸在第一个月内显著高于低火烧强度处理与对照处理。通过对土壤呼吸每天的高频观测发现土壤温度与土壤含水量并不是影响土壤呼吸动态变化的主要因子,而降雨的强度与频率是导致土壤呼吸快速波动的重要原因。

参考文献(References):

- [1] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营. 生态学报, 2018, 38(1): 1-10.
- [2] 杨玉盛, 李振问. 火对森林生态系统营养元素循环的影响. 森林防火, 1992, (3): 12-14.
- [3] van Wees D, van der Werf G R, Randerson J T, Andela N, Chen Y, Morton D C. The role of fire in global forest loss dynamics. *Global Change Biology*, 2021, 27(11): 2377-2391.
- [4] 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.
- [5] Guo J F, Chen G S, Xie J S, Yang Z J. Clear-cutting and slash burning effects on soil CO_2 efflux partitioning in Chinese fir and evergreen broadleaved forests in subtropical China. *Soil Use and Management*, 2016, 32(2): 220-229.
- [6] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [7] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [8] Carter M C, Foster C D. Prescribed burning and productivity in southern pine forests: a review. *Forest Ecology and Management*, 2004, 191(1/3): 93-109.
- [9] 刘发林, 陈小伟, 曾素平. 不同火干扰强度对枫香次生林土壤理化性质的影响. 水土保持学报, 2019, 33(5): 132-138.
- [10] 曾素平, 刘发林, 赵梅芳, 王光军, 陈小伟. 火干扰强度对亚热带四种森林类型土壤理化性质的影响. 生态学报, 2020, 40(1): 233-246.
- [11] 杨玉盛, 李振问. 林火与土壤肥力. 世界林业研究, 1993, (3): 35-42.
- [12] Robichaud P R. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. *Journal of Hydrology*, 2000, 231-232: 220-229.
- [13] Knicker H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry*, 2007, 85(1): 91-118.
- [14] 黄文韬, 胡远满, 常禹, 刘森, 张红新, 张巍. 森林火成碳研究进展. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3257-3265.
- [15] Bird M I, Wynn J G, Saiz G, Wurster C M, McBeath A. The pyrogenic carbon cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 273-298.
- [16] Neary D G, Klopatek C C, DeBano L F, Ffolliott P F. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and*

- Management, 1999, 122(1/2): 51-71.
- [17] Banning N C, Murphy D V. Effect of heat-induced disturbance on microbial biomass and activity in forest soil and the relationship between disturbance effects and microbial community structure. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(1): 109-119.
- [18] Hutchinson T. J. E. Keeley, W. J. Bond, R. A. Bradstock, J. G. Pausas, P. W. Rundel; fire in Mediterranean ecosystems. *Ecology, evolution and management*; Cambridge University Press, New York, USA, 2012, 515 pp. illus, maps, 25 cm, Hardback, ISBN 978-0- 521- 82491-0.
- [19] Zhang Y J, Qin D H, Yuan W P, Jia B R. Historical trends of forest fires and carbon emissions in China from 1988 to 2012. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(9): 2506-2517.
- [20] Wang Q K, Zhong M C, Wang S L. A meta-analysis on the response of microbial biomass, dissolved organic matter, respiration, and N mineralization in mineral soil to fire in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 2012, 271: 91-97.
- [21] FAO. *Global Forest Resources Assessment 2010: Main Report*. Rome: FAO, 2010.
- [22] Yang Z J, Chen S D, Liu X F, Xiong D C, Xu C, Arthur M A, McCulley R L, Shi S H, Yang Y S. Loss of soil organic carbon following natural forest conversion to Chinese fir plantation. *Forest Ecology and Management*, 2019, 449: 117476.
- [23] Yao C Y, Huang Q, Zhu B, Liu F. The 10-30-day oscillation of winter zonal wind in the entrance region of the East Asian subtropical jet and its relationship with precipitation in southern China. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2018, 82: 76-88.
- [24] Xu C, Yang Z J, Qian W, Chen S D, Liu X F, Lin W S, Xiong D C, Jiang M H, Chang C T, Huang J C, Yang Y S. Runoff and soil erosion responses to rainfall and vegetation cover under various afforestation management regimes in subtropical montane forest. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(14): 1711-1724.
- [25] Yang Y S, Wang L X, Yang Z J, Xu C, Xie J S, Chen G S, Lin C F, Guo J F, Liu X F, Xiong D C, Lin W S, Chen S D, He Z M, Lin K M, Jiang M H, Lin T C. Large ecosystem service benefits of assisted natural regeneration. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(2): 676-687.
- [26] Ouyang W, Lai X H, Li X, Liu H Y, Lin C Y, Hao F H. Soil respiration and carbon loss relationship with temperature and land use conversion in freeze-thaw agricultural area. *Science of the Total Environment*, 2015, 533: 215-222.
- [27] Miller A E, Schimel J P, Meixner T, Sickman J O, Melack J M. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(12): 2195-2204.
- [28] Zhou H M, Zhang D X, Wang P, Liu X Y, Cheng K, Li L Q, Zheng J W, Zhang X H, Zheng J F, Crowley D, van Zwieten L, Pan G X. Changes in microbial biomass and the metabolic quotient with biochar addition to agricultural soils: a Meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 239: 80-89.
- [29] Hursh A, Ballantyne A, Cooper L, Maneta M, Kimball J, Watts J. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 2090-2103.
- [30] Xu Y Y, Ma X C, Wang Y X, Ali S, Cai T, Jia Z K. Effects of ridge-furrow mulching system with supplementary irrigation on soil respiration in winter wheat fields under different rainfall conditions. *Agricultural Water Management*, 2020, 239: 106237.
- [31] Unger S, Máguas C, Pereira J S, David T S, Werner C. The influence of precipitation pulses on soil respiration - Assessing the "Birch effect" by stable carbon isotopes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1800-1810.
- [32] Moonis M, Lee J K, Jin H, Kim D G, Park J H. Effects of warming, wetting and nitrogen addition on substrate-induced respiration and temperature sensitivity of heterotrophic respiration in a temperate forest soil. *Pedosphere*, 2021, 31(2): 363-372.
- [33] 郑蔚, 李超, 元晓春, 郑永, 陈岳民, 林伟盛, 杨玉盛. 皆伐火烧对亚热带森林不同深度土壤 CO₂ 通量的影响. *生态学报*, 2017, 37(4): 1221-1231.
- [34] 蒲晓婷, 林伟盛, 杨玉盛, 杨智榕, 郑蔚, 元晓春, 刘小飞, 熊德成, 陈岳民. 杉木幼林土壤垂直剖面 CO₂ 通量对土壤增温的响应. *环境科学学报*, 2017, 37(1): 288-297.
- [35] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, Xie J S, Gao R, Qian W. Effects of clear-cutting and slash burning on soil respiration in Chinese fir and evergreen broadleaved forests in mid-subtropical China. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 249-261.
- [36] 李震. 皆伐与炼山对杉木林地土壤呼吸的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2005.
- [37] Wüthrich C, Schaub D, Weber M, Marxer P, Conedera M. Soil respiration and soil microbial biomass after fire in a sweet chestnut forest in southern Switzerland. *CATENA*, 2002, 48(3): 201-215.
- [38] Lytle D E, Cronan C S. Comparative soil CO₂ evolution, litter decay, and root dynamics in clearcut and uncut spruce-fir forest. *Forest Ecology and Management*, 1998, 103(2/3): 121-128.
- [39] Kranz C, Whitman T. Short communication: surface charring from prescribed burning has minimal effects on soil bacterial community composition two weeks post-fire in jack pine barrens. *Applied Soil Ecology*, 2019, 144: 134-138.

- [40] 孙龙, 武广源, 胡同欣. 大兴安岭火后不同恢复时期土壤微生物生物量动态变化. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3094-3101.
- [41] 白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 黄元元, 王丽华. 大兴安岭火烧迹地恢复初期土壤微生物群落特征. 生态学报, 2012, 32(15): 4762-4771.
- [42] Ballard T M. Impacts of forest management on northern forest soils. Forest Ecology and Management, 2000, 133(1/2): 37-42.
- [43] Kelly J, Ibáñez T S, Santín C, Doerr S H, Nilsson M C, Holst T, Lindroth A, Kljun N. Boreal forest soil carbon fluxes one year after a wildfire: effects of burn severity and management. Global Change Biology, 2021, 27(17): 4181-4195.
- [44] Bai S B, Qiu W T, Zhang H, Wang Y X, Berninger F. Soil respiration following Chinese fir plantation clear-cut: comparison of two forest regeneration approaches. Science of the Total Environment, 2020, 709: 135980.
- [45] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, Taylor A F S, Ekblad A, Höglberg M N, Nyberg G, Ottosson-Löfvenius M, Read D J. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. Nature, 2001, 411(6839): 789-792.
- [46] Gaumont-Guay D, Black T A, Barr A G, Jassal R S, Nesic Z. Biophysical controls on rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in a boreal black spruce stand. Tree Physiology, 2008, 28(2): 161-171.
- [47] Baah-Acheamfour M, Carlyle C N, Bork E W, Chang S X. Forest and perennial herbland cover reduce microbial respiration but increase root respiration in agroforestry systems. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 280: 107790.
- [48] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, Kowalski A S, Buchmann N, Epron D, Pilegaard K, Kutsch W, Longdoz B, Grünwald T, Montagnani L, Dore S, Rebmann C, Moors E J, Grelle A, Rannik Ü, Morgenstern K, Oltchev S, Clement R, Guðmundsson J, Minerbi S, Berbigier P, Ibrom A, Moncrieff J, Aubinet M, Bernhofer C, Jensen N O, Vesala T, Granier A, Schulze E D, Lindroth A, Dolman A J, Jarvis P G, Ceulemans R, Valentini R. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. Global Change Biology, 2001, 7(3): 269-278.
- [49] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. Nature, 2010, 464(7288): 579-582.
- [50] Bond-Lamberty B, Wang C K, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? Global Change Biology, 2004, 10(10): 1756-1766.
- [51] Chen G S, Yang Y S, Robinson D. Allometric constraints on, and trade-offs in, belowground carbon allocation and their control of soil respiration across global forest ecosystems. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1674-1684.
- [52] Liu X F, Lin T C, Yang Z J, Vadeboncoeur M A, Lin C F, Xiong D C, Lin W S, Chen G S, Xie J S, Li Y Q, Yang Y S. Increased litter in subtropical forests boosts soil respiration in natural forests but not plantations of *Castanopsis carlesii*. Plant and Soil, 2017, 418(1/2): 141-151.
- [53] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1992, 44(2): 81-99.
- [54] Deng Q, Zhang D Q, Han X, Chu G W, Zhang Q F, Hui D F. Changing rainfall frequency rather than drought rapidly alters annual soil respiration in a tropical forest. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 121: 8-15.
- [55] Sun Q Q, Meyer W S, Koerber G R, Marschner P. Prior rainfall pattern determines response of net ecosystem carbon exchange to a large rainfall event in a semi-arid woodland. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 247: 112-119.
- [56] Liu L L, Wang X, Lajeunesse M J, Miao G F, Piao S L, Wan S Q, Wu Y X, Wang Z H, Yang S, Li P, Deng M F. A cross-biome synthesis of soil respiration and its determinants under simulated precipitation changes. Global Change Biology, 2016, 22(4): 1394-1405.
- [57] Zheng P F, Wang D D, Yu X X, Jia G D, Liu Z Q, Wang Y S, Zhang Y G. Effects of drought and rainfall events on soil autotrophic respiration and heterotrophic respiration. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 308: 107267.
- [58] Joffre R, Ourcival J M, Rambal S, Rocheteau A. The key-role of topsoil moisture on CO₂ efflux from a Mediterranean *Quercus ilex* forest. Annals of Forest Science, 2003, 60(6): 519-526.
- [59] Liu Y C, Zhao C C, Shang Q, Su L, Wang L. Responses of soil respiration to spring drought and precipitation pulse in a temperate oak forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 268: 289-298.
- [60] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, Leffler A J, Ogle K, Pockman W T, Sandquist D R, Potts D L, Schwinning S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. Oecologia, 2004, 141(2): 254-268.
- [61] Zhu M X, De Boeck H J, Xu H, Chen Z S N, Lv J, Zhang Z Q. Seasonal variations in the response of soil respiration to rainfall events in a riparian poplar plantation. Science of the Total Environment, 2020, 747: 141222.
- [62] 杨智杰, 郑裕雄, 陈仕东, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 胥超, 杨玉盛, 史思红. 应用小波多尺度分析亚热带森林土壤异养呼吸特征. 生态学报, 2018, 38(14): 5078-5086.