

米楮人促更新林皆伐火烧后初期 土壤 CO₂ 通量动态

徐凯健, 林伟盛*, 杨智杰, 任 婕, 刘小飞, 熊德成, 谢锦升, 杨玉盛

(福建师范大学地理科学学院, 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350007)

摘要: [目的] 为科学评价皆伐、火烧对中亚热带常绿阔叶林不同深度土壤有机碳吸存的影响, [方法] 以福建省中亚热带 36 年生米楮人促更新林为研究对象, 采用非散射红外 CO₂ 浓度探测仪和 Licor-8100 土壤碳通量系统, 并结合 Fick 扩散法计算并分析 0~80 cm 不同深度土层 CO₂ 通量的日动态特征。 [结果] 表明: (1) 火烧地 (RB) 和皆伐地 (RR) 不同土层 CO₂ 浓度均出现明显下降, 其中, 对照 (CK) 地土壤 CO₂ 浓度值 (0~80 cm) 分别是 RB 和 RR 的 1.9、1.3 倍; (2) 各试验地土壤 CO₂ 通量 (0~80 cm) 表现为 RB (1.99 μmol · m² · s⁻¹) > RR (0.99 μmol · m² · s⁻¹) > CK (0.96 μmol · m² · s⁻¹), 除 20~40 cm 土层外, RB 土壤各层 CO₂ 通量均显著高于 RR 和 CK ($P < 0.05$); (3) 试验地不同土层 CO₂ 通量 (0~80 cm) 日变化幅度表现为 RB > RR > CK, 其中, RB 土壤各层的变化幅度均显著大于 RR 和 CK ($P < 0.05$), 而 RR 与 CK 间的差异表现在 0~5、10~20、20~40 cm 土层 ($P < 0.05$); (4) 拟合分析表明, 各试验地不同深度土壤 CO₂ 通量与土壤温度呈显著相关, 且 RB 的决定系数 (R^2) 显著高于 RR 和 CK; 不同试验地各土层温度、含水量的双因素模型拟合效果均优于单因素模型; Q_{10} 值显示, 皆伐、火烧后初期土壤各层的温度敏感性得到明显提高。

关键词: 土壤 CO₂ 通量; 土壤深度; 皆伐; 火烧; 土壤 CO₂ 浓度

中图分类号: S714

文献标识码: A

Analysis of CO₂ Efflux in Soil Profiles after Clear-cutting and Prescribed Burning of Natural Regenerated *Castanopsis carlesii* Secondary Forest in Subtropical China

XU Kai-jian, LIN Wei-sheng, YANG Zhi-jie, REN jie, LIU Xiao-fei, XIONG De-cheng, XIE Jin-sheng, YANG Yu-sheng

(College of Geographical Sciences, State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology,

Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China)

Abstract: Clear-cutting & prescribed burning is one of the most common management measures in the economic development of Chinese forestry, which not only has a strong interference in woodland, but also leads to the changes in soil physical and chemical properties. In order to evaluate the importance of clear-cutting and prescribed burning on the soil organic carbon uptake and storage of different depths in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest, taking 36-year-old natural regenerated *Castanopsis carlesii* secondary stand in Fujian Province as the object, the Fick's diffusion method were used to calculate the daily dynamic changes of soil CO₂ flux from 0 to 80 cm depth of soil. And the relationship between the CO₂ flux and soil temperature, moisture in soil profiles was also analyzed by using regression models. The results are as follows: (1) The CO₂ concentration in different soil layers decreased signifi-

收稿日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“常绿阔叶林人促更新对红壤有机质维持的作用机制”(31130013)

作者简介: 徐凯健(1991—), 硕士生. 主要研究方向: 森林生态系统碳循环. E-mail: phoenix-max@qq.com

* 通讯作者: 硕士, 助理实验师. 主要研究方向: 森林生态系统碳氮循环. 电话: 15659192612. E-mail: weilsnlin@fjnu.edu.cn

cantly after clear-cutting and prescribed burning, and the closer to the surface, the larger the decline. From 0 to 80 cm soil depth, the mean daily CO₂ concentration in the controlled (CK) plot was 1.9 times in residue burnt (RB) plot and 1.3 times in residue retention (RR) plot. And both in RB and RR plot, different depth of soil CO₂ concentration decreased obviously. (2) The daily dynamic changes of CO₂ flux in soil profile showed a mono-peak trend, with its maximum value mainly from 12:30 am to 15:30 pm as well as the minimum from 6:30 pm to 9:30 pm, the mean daily soil respiration in RB plot (1.99 μmol · m² · s⁻¹) was significantly higher than that in RR plot (0.99 μmol · m² · s⁻¹) and CK plot (0.96 μmol · m² · s⁻¹), the whole soil CO₂ flux in all the test plots decreased with the increasing of soil depth. The daily average CO₂ flux in soil profile of RB plot was significantly higher than the others, except for the soil depth from 20 to 40 cm. And there was no significant difference on daily CO₂ flux in soil profiles of RR and CK plot. (3) In addition, the diurnal range of soil CO₂ flux in RB plot (147%) was higher than that in the RR (99%) and the CK plot (66%), and there are some significant differences of RB vs. RR and CK ($P < 0.05$), while the RR vs. CK also existed significant difference ($P < 0.05$) in 0–5 cm, 10–20 cm and 20–40 cm soil layer. (4) By plotting CO₂ flux vs. soil temperature, it was found that the CO₂ efflux of different depth soil correlated exponentially with soil temperature in all plots, and the Q_{10} value showed that the sensitivity of soil temperature increased significantly after clear-cutting and prescribed burning. But the soil moisture was not significant correlated with CO₂ efflux. And the hybrid model of temperature and soil moisture was proved to be a more appropriate predictor of CO₂ dynamic state in all testing plots. Consequently, clear-cutting & prescribed burning could definitely affect CO₂ flux in deep soil as well as its daily dynamic, and would also change the soil CO₂ flux of soil temperature and moisture content of different soil layer response mechanism.

Key words: soil CO₂ efflux; soil depth; clear-cutting; prescribed burning; soil CO₂ concentration

土壤呼吸是土壤向大气中释放 CO₂ 的过程,是全球陆地碳循环的重要环节^[1]。全球每年由土壤呼吸产生的碳通量远高于使用化石燃料产生的碳释放总量^[2]。土壤中的 CO₂ 来源可分为土壤动物、植物根系和微生物的自养呼吸,以及土壤有机质和植物凋落物分解产生的异氧呼吸两部分^[3]。一般土壤 CO₂ 浓度伴随土壤深度的增加而增加^[4],土壤内部 CO₂ 浓度的垂直差异导致其不断向地表移动,因此,土壤呼吸是不同深度土壤 CO₂ 浓度和扩散机制共同作用的结果。深层土壤(20 cm 以下)的有机碳储量通常占土壤总量的一半以上,是土壤碳循环中的关键部分^[5];同时,土壤有机碳的矿化过程在土壤底层和表层(0~5 cm)也同等重要^[6];然而,当前大多数的相关研究只关注土壤表层的呼吸动态,忽略对深层部分的探索^[7]。深层土壤在环境因子(温度、湿度和氧气)、土壤因子(尤其是养分有效性)、微生物以及土壤有机碳自身稳定性等方面均与表层土壤存在明显的差异^[5,8-10],因此,研究深层土壤呼吸对外界环境变化的响应尤为重要。

皆伐、火烧是我国南方经济林造林最常用的营林措施,其结果不仅对林地产生强烈干扰,同时导致土壤的理化性质发生改变^[11]。近年来,已有部分学

者针对皆伐、火烧开展相关研究^[11-14],但对皆伐、火烧后土壤呼吸变化,特别是针对不同深度土壤呼吸的研究仍然缺乏。因此,本文使用 SC8000 便携式土壤 CO₂ 测定仪,结合垂直扩散模型^[15-16]对不同土壤深度(10、20、40、60、80 cm)的 CO₂ 通量进行估算,探讨皆伐(保留采伐剩余物)和火烧(无采伐剩余物)对中亚热带米楮(*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hay.) 次生林土壤呼吸日动态的影响,以期更科学地评价皆伐、火烧等营林措施对亚热带常绿阔叶林地土壤碳吸存动态的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地位于福建省三明市金丝湾的陈大林业采育场(26° 19' N, 117° 36' E),样地总面积达 17.1 hm²。地处戴云山脉西北、武夷山脉东南面,属中亚热带季风性气候,年均降水量 1 749 mm,年均气温 19.1 °C。地形以低山丘陵为主,平均海拔 330 m,平均坡度 25°~35°,该区的土壤厚度超过 1 m,且主要是由黑云母花岗岩发育的红壤。土壤部分理化性质见表 1。试验地的拟采伐林分为 1978 年经强度择伐后人促更新的米楮次生林,该林分密度为 2 650 株

· hm⁻², 平均树高 19.7 m, 平均胸径 13.5 cm。主要树种为米楮、木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.) 和闽粤栲 (*Castanopsis fissa* Rehd. et Wils) 等, 其中, 米楮为优势树种。林下植被主要是毛冬青

(*Ilexpubescens* Hook. et Arn.)、狗骨柴 (*Diplospora dubia* (Lindl.) Masam.)、矩形叶鼠刺 (*Itea chinensis* Hook. et Arn.) 和狗脊蕨 (*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.) 等。

表1 试验地土壤本底属性(0~80 cm)

土层/cm	有机 C 含量/ (g · kg ⁻¹)	C 储量/ (t · hm ⁻¹)	全 N/ (g · kg ⁻¹)	酸碱度 pH	土壤密度/ (g · cm ⁻³)	微生物量碳/ (g · kg ⁻¹)	细根生物量/ (g · m ⁻²)
0~10	28.32 ± 2.51	25.65 ± 2.37	1.74 ± 0.17	4.4 ± 0.05	0.95 ± 0.03	476.03 ± 33.20	141.16 ± 7.13
10~20	15.32 ± 4.10	14.57 ± 2.15	1.24 ± 0.50	4.4 ± 0.11	1.04 ± 0.03	377.39 ± 35.20	59.90 ± 5.28
20~40	11.50 ± 0.98	22.16 ± 4.63	0.61 ± 0.01	4.3 ± 0.27	1.20 ± 0.06	317.34 ± 43.10	70.80 ± 4.99
40~60	8.21 ± 0.61	19.23 ± 6.40	0.50 ± 0.07	4.4 ± 0.20	1.31 ± 0.07	220.86 ± 32.10	39.36 ± 5.11
60~80	6.25 ± 0.07	17.19 ± 3.22	0.380 ± 0.11	4.4 ± 0.06	1.37 ± 0.07	133.80 ± 28.40	41.89 ± 2.87

注:表中数据为均值 ± 标准差。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2012年1—2月对拟采伐米楮人促更新次生林进行皆伐,并将采伐剩余物设置2种处理,即保留(RR)和火烧(RB),火烧时间为2012年3月28日。每种处理面积约20 m × 20 m,各处理设置3个重复,6块样地的立地条件相似,按随机区组排列,试验同时选择未皆伐样地为对照(CK)。

1.2.2 土壤剖面的 CO₂ 浓度观测 皆伐、火烧后,于2012年4月初在各试验样地内分别挖取深度1 m的标准剖面,使用环刀法取得土样以测量土壤含水率、孔隙度、有机碳含量及微生物量等指标,结束后修平剖面,并在10、20、40、60、80 cm深度分别插入PVC管,布设监测土壤 CO₂ 浓度装置。实验装置布设后稳定一段时间,于2012年4月21日至27日,对每块试验地分别进行7 d每天持续24 h的观测,观测期间天气条件稳定、无降雨干扰。选用SC8000便携式土壤 CO₂ 测定仪(GMT220系列,芬兰)连续监测土壤各深度土层的 CO₂ 浓度。该仪器由主机、连接线和 CO₂ 检测器三部分组成,其中,检测器采用新型硅基非散射红外 CO₂ 设备(NDIR),能够连续测量土壤 CO₂ 浓度变化,同时避免灰尘、水汽等的影响。在测定 CO₂ 浓度时,将检测器安置在不同的土壤深度,然后连续测量不同土层 CO₂ 浓度,并自动保存数据,仪器测定时间步长为30 min。

1.2.3 土壤剖面 CO₂ 通量计算 在测得土壤 CO₂ 浓度后,依据 Fick 气体扩散法计算土壤剖面 CO₂ 通量(F_s):

$$F_s = -D_s \frac{\Delta C(z)}{\Delta z} \quad (1)$$

式(1)中: D_s 为土壤中 CO₂ 的扩散系数(m² ·

s⁻¹); C 为深度 z (m)土壤的 CO₂ 浓度(μmol · m⁻³)。

$$D_s = \varepsilon D_a \quad (2)$$

式(2)中: ε 为相对气体扩散系数; D_a 为自由大气 CO₂ 扩散系数^[17]。关于 ε 的计算模型较多,课题组的前期研究表明^[18],使用 Moldrup 扩散模型计算的土壤表层 CO₂ 通量值与使用 Li-8100 腔室法的实测结果值最接近,并达极显著相关($R^2 = 0.64$, $p < 0.01$)^[19]。因此,本文选用该模型估算土壤剖面 CO₂ 通量的变化。Moldrup 模型的计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{(\varphi - \theta)^{2.5}}{\varphi} \quad (3)$$

式(3)中: θ 为土壤体积含水量(cm³ · cm⁻³), φ 为土壤孔隙度^[17]。

1.2.4 土壤表层的 CO₂ 通量观测 采用 Li-8100 腔室法同时段对各试验样地的土壤表层(0~5 cm) CO₂ 通量进行日动态观测。

1.2.5 土壤剖面的温度与含水量观测 在土壤垂直剖面各土层中分别插入2支温度和水分探头(H₂O Model EC-5,英国),进行实时持续观测,其时间步长与土壤 CO₂ 浓度观测一致。

1.3 数据处理

使用 SPSS19.0 和 Origin8.0 软件进行数据处理及图形绘制。对所用数据均进行前处理,并通过正态分布检验和 F 检验,使用剔除异常值后的均值进行计算和分析。采用指数模型($R = a \times e^{bT}$)、线性模型($R = a \times W + b$)及双因素模型($R = a \times e^{bT} \times W^c$) (式中: R 为土壤呼吸通量; a 、 b 、 c 为参数; T 为土壤温度, W 为土壤含水量)拟合不同营林措施下土壤剖面 CO₂ 通量与土壤温度、含水量的关系,并计算土壤各层的温度敏感性指数 Q_{10} 值($Q_{10} = R^{(T+10)} / R^T = e^{10b}$)^[20]。

2 结果与分析

2.1 不同更新方式下土壤剖面 CO₂ 浓度日变化

对 RR、RB 及 CK 进行土壤 CO₂ 浓度动态监测结果(图1)显示:各试验地土壤 CO₂ 浓度均随土壤深度的增加而增大,其中,CK 土壤 CO₂ 浓度(0~80 cm)日变化范围为 3 099~14 250 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,RR 和 RB 土壤 CO₂ 浓度(0~80 cm)日变化范围则分别为 1 715~10 400、798~9 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,CK 的土壤 CO₂ 浓度(0~80 cm)日均值分别是皆伐和

火烧后的 1.3 倍和 1.9 倍。CK 各土层(10、20、40、60、80 cm,下同)的 CO₂ 浓度日均值分别是 3 419、5 350、7 374、9 383、12 427 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$;与 CK 相比,RR 各土层 CO₂ 浓度值依次下降了 24.83%、20.94%、18.33%、20.01%、29.29%;而 RB 各土层 CO₂ 浓度值则分别下降了 66.78%、46.02%、47.52%、43.43%、50.53%。此外,各试验地不同深度土层 CO₂ 浓度均大体呈单峰变化曲线,但峰值的出现时间存在一定差异,表明皆伐和火烧处理初期并未改变深层土壤 CO₂ 通量的日变化趋势。

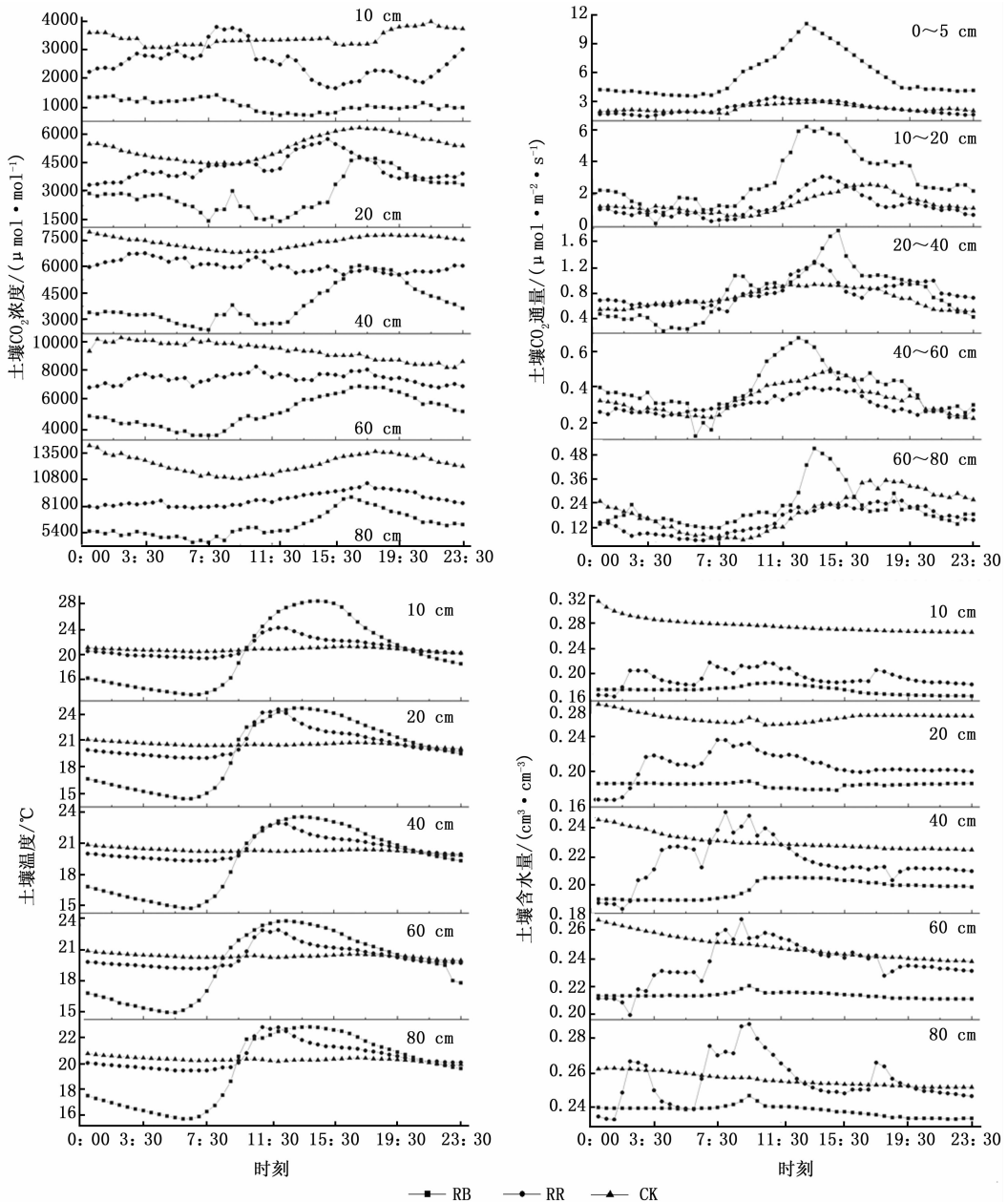


图1 不同营林措施下土壤剖面的 CO₂ 浓度、土壤 CO₂ 通量、土壤温度及土壤含水量日动态

2.2 不同试验地土壤 CO₂ 通量变化及垂直分布

利用 Fick 扩散法计算 RB、RR 和 CK 各层土壤 CO₂ 通量,结果(图1)显示:CO₂ 通量日变化均呈单峰型,其峰值出现在 12:30—15:30。各试验地土壤 CO₂ 通量的差异体现在 0~5、10~20、40~60、60~80 cm 土层中,RB 各土层日均 CO₂ 通量(分别为 5.67、2.86、0.82、0.39、0.23 μmol·m⁻²·s⁻¹)均显著高于 RR(分别为 2.27、1.29、0.81、0.29、0.16 μmol·m⁻²·s⁻¹)和 CK(分别为 2.29、1.42、0.74、0.33、0.2 μmol·m⁻²·s⁻¹; $P < 0.05$),而 RR 与 CK 各层土壤日均 CO₂ 通量差异不显著($P > 0.05$),表明火烧处理初期导致深层土壤 CO₂ 通量产生较大变化,而皆伐处理初期并未产生类似的结果。此外,RB、RR、CK 土壤(0~80 cm)的 CO₂ 日通量为

1.99、0.99、0.96 μmol·m⁻²·s⁻¹,且火烧后土壤 CO₂ 通量更集中于土壤表层(比例由 46% 提升至 57%),这可能与不同处理初期各自土壤理化特性的变化程度有关。

此外,RB、RR 和 CK 土壤(0~80 cm)CO₂ 通量的日变化幅度(以最大值与最小值之差除以平均值,下同)分别为 147%、99% 和 66%,且 RB 在土壤各层的 CO₂ 通量日变化幅度均显著高于 RR 和 CK($P < 0.05$;图2),RR 与 CK 在 0~5、10~20、20~40 cm 土层的日变化幅度存在显著差异($P < 0.05$)。由此可见,皆伐和火烧初期均使不同深度土壤的 CO₂ 通量日动态过程产生明显扰动,并加剧其变化过程的不稳定性。

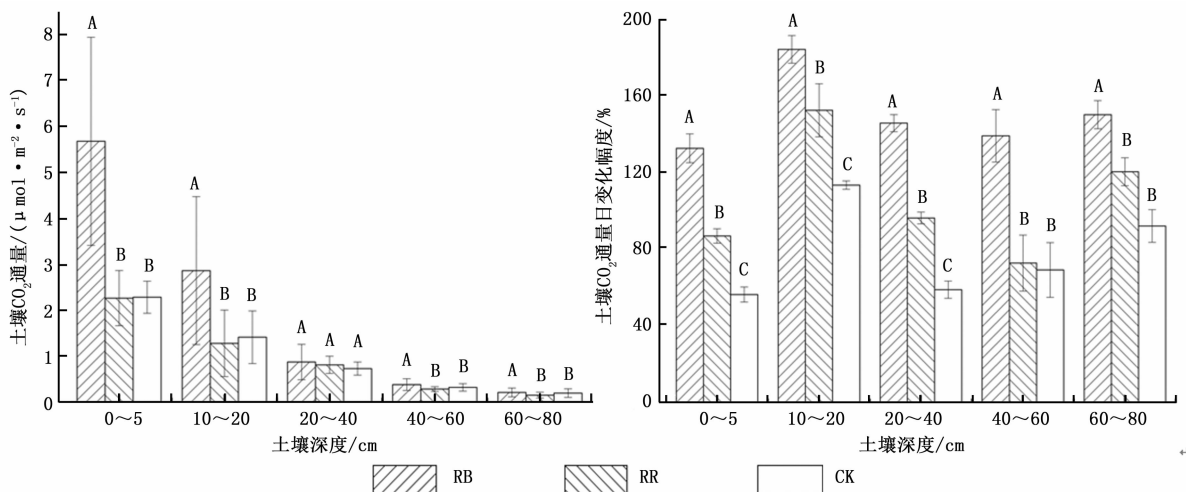


图2 不同深度土壤 CO₂ 通量与日变化幅度分布(图中不同大写字母表示同一深度土层不同处理间差异显著($p < 0.05$))

2.3 土壤 CO₂ 通量与土壤温度、含水量的关系

2.3.1 土壤温度和含水量的日动态 RB、RR 和 CK 各土层之间土壤温度的日变化差异较大(图1),其中,CK 各土层温度的日变化相对平稳,无明显峰值;而 RB 和 RR 与其自身 CO₂ 通量变化模式类似,呈明显的单峰型趋势(峰值时间为 9:30—10:30);各试验地各土层(0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm)土壤温度日变化幅度显示为 RB(分别为 74.8%、52.0%、45.5%、45.0%、36.3%) > RR(分别为 23.2%、26.5%、17.7%、18.2%、16.3%) > CK(分别为 4.98%、5.21%、4.97%、4.52%、4.11%)。不同试验地土壤含水量的日变化也存在明显差异,其中,RR 各土层含水量日变化幅度较大(21%~32%),CK 其次(5%~17%),而 RB 则相对平稳(4%~12%);在 10、20、40 cm 土层,CK 的平均含水量显著高于 RR 与 RB($P < 0.05$),随着土壤

深度的下降,各试验地相同土层的平均含水量趋于一致。

2.3.2 土壤温度、含水量对土壤 CO₂ 通量的影响

运用指数模型($R = a \times e^{bt}$)和线性模型($R = a \times W + b$)分别对土壤各层 CO₂ 通量和土壤温度、含水量进行拟合,结果(表2)显示:各试验地土壤(0~80 cm)CO₂ 通量与土壤温度呈较好的指数关系($p < 0.01$),其 R^2 分别为 0.540~0.797(RB)、0.423~0.608(RR)和 0.128~0.380(CK),整体表现为 RB > RR > CK;随土壤深度的增加,CK 土壤的 Q_{10} 值呈上升趋势,但皆伐、火烧后部分土层的 Q_{10} 值垂直变化趋势不明显(如 RB、RR 的 60 cm 层),且 RR 和 RB 不同深度土壤的 Q_{10} 值均显著高于 CK($p < 0.05$)。RR、RB 和 CK 各土层 CO₂ 通量与含水量线性模型的 R^2 普遍较低,但在相关性上,RB 除 80 cm

土层外均达极显著相关($P < 0.01$), CK 除 20、60 cm 土层外,其余土层也达到极显著相关($P < 0.01$);火烧后(RB)土壤(0~60 cm) CO_2 通量与含水量的相关系数(R^2)均明显提高($P < 0.01$)。此外,采用土壤温度与含水量的双因素模型($R = a \times e^{bT} \times W^c$),可

分别解释 RB、RR 和 CK 各土壤深度土壤 CO_2 通量变化的 53.6%~96.1%、41.0%~72.9% 和 39.7%~65.4%,拟合结果明显优于以温度为单因子的指数模型,表明土壤温度与含水量在较大程度上共同影响土壤 CO_2 通量的变化。

表2 各试验地不同深度土壤 CO_2 通量与土壤温度、含水量的相关关系

试验地	土壤深度/ cm	土壤温度				土壤含水量			双因素 R^2
		参数				参数			
		a	b	Q_{10}	R^2	a	b	R^2	
RB	10	1.547	0.061	1.84	0.797**	197.73	-29.47	0.285**	0.961**
	20	0.117	0.113	3.10	0.718**	-511.03	97.40	0.647**	0.876**
	40	0.043	0.146	4.31	0.732**	48.77	-8.81	0.621**	0.760**
	60	0.070	0.084	2.32	0.540**	29.71	-5.95	0.213**	0.675**
	80	0.025	0.136	3.90	0.572**	-1.10	0.48	0.010	0.536**
RR	10	0.113	0.141	4.10	0.608**	20.44	-1.76	0.188**	0.729**
	20	0.106	0.151	4.53	0.564**	-3.41	1.99	0.060	0.540**
	40	0.031	0.158	4.85	0.605**	-0.66	0.96	0.030	0.597**
	60	0.027	0.116	3.19	0.596**	1.81	-0.14	0.298**	0.626**
	80	0.010	0.302	—	0.423**	-0.70	0.34	0.022	0.410**
CK	10	0.128	0.025	1.28	0.380**	-11.91	5.59	0.132**	0.513**
	20	0.720	0.071	2.03	0.340**	17.63	-3.19	0.028	0.405**
	40	0.613	0.096	2.61	0.296**	-10.04	3.05	0.177**	0.654**
	60	0.151	0.107	2.92	0.337**	-2.42	0.93	0.062	0.397**
	80	0.080	0.133	3.78	0.128*	-14.59	3.94	0.354**	0.466**

注: * 表示差异显著($P < 0.05$), ** 表示差异极显著($P < 0.01$), — 表示数值存在异常。

3 结论与讨论

3.1 土壤 CO_2 浓度垂直梯度的日动态

本研究中,RR、RB 和 CK 的土壤 CO_2 浓度均随土层深度的增加而上升,这与多数关于森林土壤剖面 CO_2 浓度的研究结论一致^[20-21]。在整个观测期间,CK 土壤(0~80 cm)的 CO_2 浓度日均值(0~80 cm)分别是 RR 和 RB 的 1.3、1.9 倍。同时与 CK 相比,皆伐、火烧后土壤各层的 CO_2 浓度均发生了不同幅度的下降,其中,土壤表层(10 cm)和底层(80 cm) CO_2 浓度的降幅最大,RB 各土层 CO_2 浓度的下降幅度也明显高于 RR。这可能与皆伐、火烧处理有效降低了土壤密度,使土壤内部的微生物活性降低,加速 CO_2 在土壤中的移动和扩散速率有关^[22-23];而室内实验的结果表明,皆伐、火烧后初期,其土壤密度(0~80 cm)分别降低了 10.65%、8.28%。对于 RB 土壤各层 CO_2 浓度均显著低于 RR($P < 0.05$),则可能是由于其表层土壤团聚体在高温火烧下遭到破坏^[24],导致表层土壤孔隙度进一步扩大,使聚集在表层以下的土壤 CO_2 快速扩散至地表,最终造成土壤深层 CO_2 浓度的大幅降低。此外,RR、RB 和 CK 的土壤 CO_2 日变化趋势均呈单峰型,且土壤表

层 CO_2 浓度的变化幅度普遍高于土壤深层,与类似的研究结果相近^[25]。

3.2 皆伐、火烧对土壤剖面 CO_2 通量日变化的影响

皆伐和火烧作为我国常见的营林措施,会显著改变林地土壤中植物根系、微生物的组成与活性等^[26],从而使土壤的 CO_2 通量发生变化。本研究中,皆伐和火烧处理初期未改变土壤各层 CO_2 通量的日变化趋势,RB、RR 和 CK 土壤的 CO_2 通量日变化动态均呈单峰型,与刘乐中等^[26]对杉木林的相关研究结果相似。研究发现,各土层温度的日变化亦呈单峰型,其变化趋势与对应土层的土壤 CO_2 通量变化一致,因此,温度可能是主导土壤 CO_2 通量变化趋势的主要原因(回归分析显示,各土层土壤温度与 CO_2 通量普遍呈极显著相关, $p < 0.01$)。此外,RB、RR 和 CK 土壤(0~80 cm)的 CO_2 日通量表现为 RB($1.99 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > RR($0.99 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > CK($0.96 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。各试验地之间土壤 CO_2 通量的差异主要体现在 0~5、10~20、40~60、60~80 cm 土层中,表现为 RB 土壤日均 CO_2 通量显著高于 RR 和 CK(图 2; $P < 0.05$),这与国内外针对土壤 CO_2 通量的相关观测结果相

近^[22,26-28]。火烧处理明显增加了深层土壤的 CO₂ 通量,这可能是由于火烧后不同土层密度、有机质含量及微生物数量均低于未烧地^[27-28],从而直接或间接增加了土壤的 CO₂ 通量^[29]。Bauhus 等^[28]研究发现,林木在火烧后会使其土壤内微生物的呼吸量明显上升,从而使 CO₂ 通量大大超过原先水平。另外,RR、RB 和 CK 在 20~40 cm 土层的 CO₂ 通量差异不显著,这可能与该层通常作为土壤有机层和矿物质层的分界区,其 CO₂ 传输作用强烈有关,王超等^[18]在对杉木林不同深度土壤 CO₂ 通量的研究中也发现类似结果。一般皆伐处理也会导致矿物质土壤中微生物活性及现存有机质分解速率的有效提升^[30],但本研究中,RR 土壤剖面的 CO₂ 通量与 CK 差异不显著,这可能与在皆伐处理初期,其土壤内部环境的变化具有一定的时滞性有关^[22]。

皆伐、火烧处理同样改变了土壤剖面 CO₂ 通量的日变化幅度,表现为 RB 高于 RR 和 CK(图 2, $P < 0.05$),而 RR 与 CK 在 0~5、10~20 和 20~40 cm 土层的变化幅度差异显著($P < 0.05$),这与目前针对土壤表层的部分研究结果相近^[22-23]。其差异的产生可能是由于土壤中的细根受到火烧、皆伐的影响而部分死亡,被微生物分解后释放出大量 CO₂,而不同土壤内分解速率的差异则会显著干扰其 CO₂ 通量的变化^[25];同时,森林经历皆伐、火烧失去茂密植被覆盖物后,也会使其土壤温度和土壤内呼吸速率变化过程的稳定性明显下降^[11],如本研究中 RR、RB 不同土层温度的日变化幅度为 16.3%~74.8%,CK 的变化幅度则不足 5.2%。对于 RR 与 RB 之间土壤 CO₂ 通量的显著差异,则可能与 RR 内保留了采伐物以及土壤中细根的存活量更多有关^[31],其结果导致了 RB 土壤剖面 CO₂ 通量的日变化幅度增大($P < 0.05$)。此外,亚热带阔叶森林土壤表层 0~20 cm 内的 CO₂ 通量约占土壤呼吸总量的 74%,而火烧过后该比重会进一步提升至 86%,这可能与 RB 表层的土壤团聚体在高温火烧后产生破坏、土壤孔隙度进一步增大,使聚集在土壤表层以下部分的 CO₂ 更多地扩散到地表有关^[22,32]。

3.3 土壤 CO₂ 通量对土壤温度、含水量的响应

RR、RB 和 CK 不同深度土壤 CO₂ 通量与土壤温度普遍达到极显著相关($P < 0.01$),这与多数研究土壤温度与土壤 CO₂ 通量关系的结论一致^[22-23,26-28]。其中,RB 各土层 CO₂ 通量与土壤温度的 R^2 最高,其能分别解释 RB、RR 和 CK 土壤各

层 CO₂ 通量变化的 54%~79.7%、42.3%~60.8% 和 12.8%~38%,这可能是由于森林经历火烧后完全失去地表植被覆盖物,使土壤温度的日变化幅度明显增大^[11],且火烧后土壤孔隙度上升,可能导致土壤 CO₂ 通量更易受外界温度变化的影响^[14],Rsik 等^[33]对亚寒带森林土壤的研究也得到类似结果。另外,林地在经过皆伐、火烧后,其植物根系逐渐死亡^[34-35],土壤 CO₂ 的来源逐渐以异氧呼吸方式为主;而 CK 的土壤根系呼吸所占比重较大,其根系呼吸的影响因素相对复杂^[36],导致 RB、RR 的土壤 CO₂ 通量与土壤温度具有更高的相关性。本研究中,RB、RR 和 CK 在 10 cm 与 20 cm 深度土壤 CO₂ 通量与温度的相关性明显高于 80 cm 土层,这可能是由于土壤剖面理化性质不均一造成的,因为试验地本底 0~20 cm 的土壤密度明显偏低(表 1)。

相比土壤温度,土壤含水量对 CO₂ 通量影响的贡献率普遍较低,这可能与土壤含水量变化常处在稳定的阈值范围内^[37-38]及在短期内的变化不显著有关^[18],如本研究中土壤含水量的变化幅度明显小于土壤温度;但土壤剖面 CO₂ 通量与土壤温度、含水量双因素模型的拟合效果十分显著,使用该模型可以共同解释 RB、RR 和 CK 的土壤呼吸变化的 53.6%~96.1%、41.0%~72.9% 和 39.7%~65.4%,结果明显优于土壤温度单因素模型,表明含水量可能通过影响土壤温度,进一步对 CO₂ 通量产生影响。此外,我国森林土壤的 Q_{10} 值一般为 1.33~5.53^[39],本研究中土壤呼吸 Q_{10} 值均处于该范围,同时 RB、RR 的土壤剖面呼吸 Q_{10} 值均明显高于 CK,表明皆伐、火烧初期土壤剖面呼吸速率的温度敏感性明显提升。

皆伐、火烧对森林生态系统的影响是一个复杂的渐进过程,因此,未来还需要结合长期的定位观测,同时进一步扩展对影响土壤呼吸的微生物群落及酶等要素的研究,以便更深入地了解营林更新后其整个生态系统碳吸存的变化过程。

参考文献:

- [1] Xu Z F, Tang S S, Xiong L, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration in China's forest ecosystems: Patterns and controls[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 93: 105-110.
- [2] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-583.
- [3] Pumpanen J, Ilvesniemi H, Kulmala L, *et al.* Respiration in boreal forest soil as determined from carbon dioxide concentration profile[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(5): 1187-1196.

- [4] DeSutter T M, Sauer T J, Parkin T B, *et al.* A subsurface, closed-loop system for soil carbon dioxide and its application to the gradient efflux approach[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(1): 126–134.
- [5] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle[J]. *Plant and Soil*, 2011, 338(1–2): 143–158.
- [6] Salomé C, Nunan N, Pouteau V, *et al.* Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16: 416–426.
- [7] Hashimoto S, Tanaka N, Kume T, *et al.* Seasonality of vertically partitioned soil CO₂ production in temperate and tropical forest[J]. *Journal of Forest Research*, 2007, 12(3): 209–221.
- [8] 盛浩, 罗莎, 周萍, 等. 土壤 CO₂ 浓度的动态观测模拟和应用[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2916–2922.
- [9] Powlson D S, Brookes P C, Whitmore A P, *et al.* Soil Organic Matters[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1): 1–4.
- [10] Torn M S, Lapenis A G, Timofeev A, *et al.* Organic carbon and carbon isotopes in modern and 100-year-old-soil archives of the Russian steppe[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(10): 941–953.
- [11] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, *et al.* Effects of clear-cutting and slash burning on soil respiration in Chinese fir and evergreen broad-leaved forests in mid-subtropical China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 249–261.
- [12] 安静, 王文杰, 王洪岩, 等. 人工林皆伐对土壤碳及相关理化性质的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(9): 57–63.
- [13] Maranon-jimenez S, Castro J, Kowalski A S, *et al.* Post-fire soil respiration in relation to burnt wood management in a Mediterranean mountain ecosystem[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(8): 1436–1447.
- [14] Kulmala L, Aaltonen H, Berninger F, *et al.* Changes in biogeochemistry and carbon fluxes in a boreal forest after the clear-cutting and partial burning of slash[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 188: 33–44.
- [15] DeSutter T M, Sauer T J, Parkin T B, *et al.* A subsurface, closed-loop system for soil carbon dioxide and its application to the gradient efflux approach[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(1): 126–134.
- [16] Liang N, Hirano T, Zheng Z M, *et al.* Continuous measurement of soil CO₂ efflux in a larch forest by automated chamber and concentration gradient techniques[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2010, 7(1): 1345–1375.
- [17] Jones H G. *Plant and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology* [M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1992: 51–51.
- [18] 王超, 黄群斌, 杨智杰, 等. 杉木人工林不同深度土壤 CO₂ 通量[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5711–5719.
- [19] Moldrup P, Olesen T, Gamst J, *et al.* Predicting the gas diffusion coefficient in repacked soil: water-induced linear reduction model[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1588–1594.
- [20] Davidson E A, Kathleen E, Susan E, *et al.* Vertical partitioning of CO₂ production within a temperate forest soil[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 944–956.
- [21] Hirano T, Kim H, Tanaka Y. Long-term half-hourly measurement of soil CO₂ concentration and soil respiration in a temperate deciduous forest[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108: 1–13.
- [22] 林伟盛, 杨智杰, 郭剑芬, 等. 米楮天然更新次生林皆伐火烧后初期土壤呼吸日变化[J]. *福建师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 29(2): 68–74.
- [23] Wu X, Brüggemann N. Long-term effects of clear-cutting and selective cutting on soil methane fluxes in a temperate spruce forest in southern Germany[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2467–2475.
- [24] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 3–27.
- [25] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7–20.
- [26] 刘乐中, 杨玉盛, 郭剑芬, 等. 杉木人工林皆伐火烧后土壤呼吸研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(1): 8–14.
- [27] Hatten J A, Zabowski D, Ogden A, *et al.* Soil organic matter in a ponderosa pine forest with varying seasons and intervals of prescribed burn [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2555–2565.
- [28] Wanhongchai K, Bauhus J, Goldammer J G. Nutrient losses through prescribed burning of aboveground litter and understory in dry dipterocarp forests of different fire history[J]. *Catena*, 2008, 74(3): 321–332.
- [29] Hartley I P, Heinemeyer A, Evans S P, *et al.* The effect of soil warming on bulk soil vs. rhizosphere respiration [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(12): 2654–2667.
- [30] Kim C. Soil CO₂ efflux in clear-cut and uncut red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) stands in Korea[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(8–9): 3318–3321.
- [31] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 584–590.
- [32] Gaudinski J B, Trumbore S E, Davidson E A, *et al.* Soil carbon cycling in a temperate forest: Radiocarbon-based estimates of residence times, sequestration rates and partitioning of fluxes[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 51: 33–69.
- [33] Risk D, Kellman L, Beltrami H. Carbon dioxide in soil profiles: production and temperature dependence[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(6): 11–14.
- [34] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 林木根呼吸及测定方法进展[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(3): 426–434.
- [35] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, *et al.* Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration [J]. *Nature*, 2001, 411(6839): 789–792.
- [36] Tang J W, Laurent M, Alexander G, *et al.* Continuous measurements of soil respiration with and without roots in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132(3/4): 212–227.
- [37] Davidson E A, Savage K E, Trumbore S E, *et al.* Vertical partitioning of CO₂ production within a temperate forest soil [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(6): 944–956.
- [38] Heinemeyer A, Di B C, Lloyd A R, *et al.* Soil respiration: implications of the plant-soil continuum and respiration chamber collar-insertion depth on measurement and modelling of soil CO₂ efflux rates in three ecosystems [J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1): 82–94.
- [39] 陈光水, 杨玉盛, 吕萍萍, 等. 中国森林土壤呼吸模式[J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1748–1761.