

DOI: 10.5846/stxb201608191698

郑永, 刘小飞, 郑蔚, 周嘉聪, 苏瑞兰, 林伟盛, 熊德成, 胥超, 陈岳民, 杨玉盛. 应用高频观测探讨不同森林经营方式下矿质土壤呼吸的昼夜动态特征. 生态学报, 2017, 37(1): - .

Zheng Y, Liu X F, Zheng W, Zhou J C, Su R L, Lin W S, Xiong D C, Xu C, Chen Y M, Yang Y S. High-frequency analysis of the diel patterns of mineral soil respiration under different forest management. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): - .

应用高频观测探讨不同森林经营方式下矿质土壤呼吸的昼夜动态特征

郑永^{1,2}, 刘小飞^{1,2,*}, 郑蔚^{1,2}, 周嘉聪^{1,2}, 苏瑞兰³, 林伟盛^{1,2}, 熊德成^{1,2}, 胥超^{1,2}, 陈岳民^{1,2}, 杨玉盛^{1,2}

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

3 三明市三元区林业局, 三明 365000

摘要: 矿质土壤呼吸是森林生态系统土壤碳库损失的重要途径之一, 也是森林生态系统碳(C)衡估算中的关键因子。了解矿质土壤呼吸在不同时间尺度上的变化, 对理解森林生态系统 C 循环应对全球变化的响应至关重要, 而高频观测是探讨矿质土壤呼吸在不同时间尺度变化的重要手段之一。本文通过高频自动观测系统与 Li-8100 土壤 CO₂ 通量测量系统, 对福建省三明市陈大镇国有林场的米槠 (*Castanopsis carlesii*) 次生林在不同森林经营方式下 (CK 对照, RR 皆伐, RB 火烧) 的矿质土壤呼吸与土壤温度和含水量的昼夜动态进行分析, 并比较 2 种采样策略下矿质土壤呼吸的年、日均通量差异。结果表明; 1) 不同森林经营方式的矿质土壤呼吸与土壤温度和土壤含水量均存在着明显的季节动态, 矿质土壤呼吸速率年均值表现为 CK (2.18 μmol m⁻² s⁻¹) > RB (1.93 μmol m⁻² s⁻¹) > RR (1.89 μmol m⁻² s⁻¹)。2) 在不同森林经营方式下, 采用手动观测的矿质土壤呼吸年平均日通量显著低于高频观测结果, 而采用高频观测 9:00—11:00 时间段内观测数据计算日通量与高频自动观测系统全天 (24 小时) 结果无显著差异; 3) 不同森林经营方式下的林地, 土壤水热条件的变化是影响矿质土壤呼吸的重要因素之一。双因子模型拟合结果表明, 土壤温度和含水量共同解释了 CK、RR 和 RB 矿质土壤呼吸速率的年变化的 96.8%, 62.8%, 95.4%, 拟合结果明显优于以温度为单因子的指数模型。因此, 未来气候变化背景下, 为准确评估和预测不同森林经营方式对土壤与大气间碳通量交换的影响, 采用高频自动观测技术观测矿质土壤呼吸, 将有利于提高碳通量估算精度。

关键词: 不同森林经营方式; 高频自动观测; 矿质土壤呼吸; 昼夜动态; 碳通量

High-frequency analysis of the diel patterns of mineral soil respiration under different forest management

ZHENG Yong^{1,2}, LIU Xiaofei^{1,2,*}, ZHENG Wei^{1,2}, ZHOU Jiacong^{1,2}, SU Ruilan³, LIN Weisheng^{1,2}, XIONG Decheng^{1,2}, XU Chao^{1,2}, CHEN Yuehmin^{1,2}, YANG Yusheng^{1,2}

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

2 Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

3 Sanyuan District Forestry Bureau of Sanming, Sanming, Fujian 365000, China

Abstract: Mineral soil respiration is an important route for the loss soil carbon (C) in forest ecosystems, and it is a key factor for estimating the forest ecosystem carbon balance. Making sense of mineral soil respiration variation on temporal and

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (31130013) 国家自然科学基金 (31500407) 福建省教育厅 B 类科技项目 (JB14025)

收稿日期: 2016-08-19; **修订日期:** 2016-00-00

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

spatial scales is a critical component of understanding forest ecosystem C cycle responses to climate change. Thus, high-frequency measurements have become one of the primary tools used to measure mineral soil respiration on both temporal and spatial scales. The objective of this study was to compare a manual system (Li-8100A) with an automated system for measuring mineral soil respiration in a subtropical forest. We carried out the study in a secondary *Castanopsis carlesii* forest with different forest management (Control, CK; Residual retention after clear cutting, RR; Residual burning after clear cutting, RB) in Sanming, Fujian. The results obtained were as follows. (1) The mineral soil respiration flux, soil temperature, and soil moisture content under different forest managements all showed obvious seasonal dynamics, and mineral soil respiration rates were in the order of CK ($2.18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) > RB ($1.93 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) > RR ($1.89 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). (2) The annual flux determined using high-frequency measurement was significantly higher than that determined using the manual system, whereas there was no difference between the soil respiration rate calculated between 09:00 and 11:00 (high-frequency data) for different forest managements. (3) Soil hydrothermal condition is one of the important factors affecting mineral soil respiration under different forest management. A two-factor model show that included soil temperature and moisture explained the annual variation of mineral soil respiration rate as 96.8%, 62.8% and 95.4% in CK, RR, and RB treatments, respectively. The double factors model demonstrated that combined with soil temperature and moisture was explained the annual variation of mineral soil respiration rate 96.8%, 62.8% and 95.4% in CK, RR and RB, respectively. The results obtained using this model were better than those obtained using a single-factor model. Therefore, in order to accurately assess and predict the effects of different forest management on the C flux exchange between the soil and atmosphere under future climate change, high-frequency measurements should be considered.

Key Words: different forest management practice; high frequency automatic observation; soil heterogeneous respiration; diurnal dynamics; carbon flux

土壤是陆地生态系统中最大的碳库,据估计,全球土壤有机碳库约 1500 Pg ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$),约是大气碳库的 2 倍,生物碳库的 3 倍^[1]。土壤呼吸是土壤碳库和大气碳库交换的主要方式之一,其观测手段主要为手动观测和自动观测,由于土壤呼吸的时空异质性,现今对土壤呼吸通量的评估仍存在着许多不确定性^[2]。如:Savage 等^[3]在美国哈佛森林发现手动观测低估土壤呼吸日通量的 13%,而 Wang 等^[4]在加拿大农田生态系统发现手动观测值相较于高频观测高估了土壤呼吸日通量的 17%,手动观测的局限性在于不能进行短时间内频繁的观测,也无法准确评估土壤呼吸对降雨、寒潮等特殊事件的响应,而高频自动观测方法能准确、迅速捕捉土壤呼吸对各种事件的响应过程,对评估未来气候变化下不同生态系统土壤呼吸的变化,进而估算全球碳通量有着重要的意义^[5,6,7]。

土壤异养呼吸是森林生态系统土壤碳库损失的重要途径,也是森林生态系统碳平衡主要分量之一,与净初级生产力共同决定森林碳汇的大小^[8,9],热带和亚热带森林生态系统中异养呼吸占土壤总呼吸的 60%—76%^[10],而矿质土壤呼吸占异养呼吸的 30%—83%^[11]。矿质土壤呼吸主要来源于土壤微生物分解有机质释放的 CO_2 ,而土壤水分和温度是影响微生物活性的关键因子,其表现在土壤温度升高提高微生物活性,加快有机质的分解速度,土壤含水量的增加则会有利于土壤中溶解性有机质的扩散,提高微生物可利用养分,从而促进矿质土壤呼吸^[12,13]。

有关森林土壤呼吸及其影响因素的研究已有大量报道^[14,15,16],但主要集中在温带森林^[17,18]。炼山是亚热带地区的主要造林方式,现今有关营林活动(特别是皆伐和火烧等)对亚热带森林矿质土壤呼吸的昼夜动态的研究则鲜有报道。因而,本研究通过对亚热带森林不同经营方式下矿质土壤呼吸进行手动和自动观测,探讨不同经营方式的中亚热带米槠林矿质土壤呼吸之间的昼夜动态特征,以及手动观测与自动观测对矿质土壤呼吸年通量估算的差异性,提高未来气候变化情景下不同森林经营方式下土壤与大气间 CO_2 交换量的估算精度,进一步改进土壤呼吸经验模型。

1 研究区概况

试验地位于福建三明森林生态系统与全球变化野外观测研究站-陈大观测点(26°19'N, 117°36'E), 平均海拔 330 m, 平均坡度 33°, 年均气温 19.1 °C, 年均降水量 1749 mm, 属中亚热带季风性气候。本区内土壤厚度超过 1 m, 由黑云母花岗岩发育的红壤。米楮次生林前身为米楮天然林, 1978 年天然林皆伐后天然更新演替形成, 林分密度为 2650 株·hm⁻², 平均树高 19.7 m, 平均胸径 13.5 cm。主要树种为米楮(*Castanopsis carlesii*)、闽粤栲(*Castanopsis fissa* Rehd)、木荷(*Schima superba*)等, 以米楮为优势树种。林下植被主要有毛冬青(*Ilex pubescens* Hook)、狗骨柴(*Tricalysiadubia*)、矩圆叶鼠刺(*Iteachinensis*)、沿海紫金牛(*Ardisia punctate*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)等。试验地土壤理化性质见表 1。

表 1 试验地土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of the study sites

试验地 Study site	土壤深度 Soil depth/cm	土壤碳含量 Soil carbon content/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	微生物量碳 Microbial biomass/ (mg/kg)	pH 值 pH value
对照 CK	0—10	28.32±2.51a	1.74±0.17a	0.15±0.04a	476.03±33.20a	4.40±0.05a
皆伐 RR	0—10	21.30±0.91b	1.81±0.03a	0.10±0.00b	327.10±68.82b	4.26±0.54a
火烧 RB	0—10	17.68±5.12b	1.43±0.01b	0.10±0.01ab	285.90±16.31b	4.14±0.21a

不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异($p < 0.05$), 图中数据为平均值±标准差($n = 3$)

2 研究方法

2.1 样地设置与矿质土壤呼吸测定

2011 年 11 月在米楮次生林(总面积为 17.1 hm²)设置 9 块 20 m×20 m 标准地, 分布于 4 个山坡, 山坡间有 30 m 左右的坡沟相隔。样地于 2011 年 12 月、2012 年 3 月相继完成皆伐和火烧处理, 各处理设置 3 个重复, 并按随机区组排列, 其处理分别为:(1)将原有次生林作为对照处理(CK); (2)在采伐迹地上采取人促更新, 即皆伐(Residue Retention, RR); (3)对采伐迹地上火烧后人工造林, 即火烧(Retention Burning, RB)。采用壕沟法去根: 2012 年 4 月, 在各标准样地上、中、下各布设 1 m×1 m 的正方形区域, 在其四周用铁锹挖壕沟, 垂直挖深 0.6—0.8 m (看不到根系), 切断根(不移走)后插入细密的尼龙网(100 目)以阻止根向小区内生长^[19], 贴地面剪除小区内的植被, 所有挖壕沟小区定期清理地表植被。

矿质土壤呼吸测定采用 Li-8100A (美国, 基因公司) 土壤 CO₂ 通量全自动测量系统测定, 矿质土壤呼吸测定频率为每半个小时测定 1 次, 全天 24 h 不间断测定。在测定矿质土壤呼吸速率的同时, 应用 Li-8100A 配套的土壤温湿度传感器测定土壤 5 cm 深处的温度和体积含水量。观测时间为 2013 年 8 月到 2014 年 7 月, 并分别在 2013 年 8 月、10 月、12 月和 2014 年 3 月, 选择连续 3 天晴朗天气, 其观测的数据分别代表 2013 年夏季、秋季、冬季和 2014 年春季矿质土壤呼吸。

于相同的观测时间段内, 使用 Li-8100 开路式土壤碳通量测量系统在 9:00—12:00 手动测定矿质土壤呼吸^[20], 每个测定点测定时间为 2 min, 观测时间在每个月月中(15 日左右)和月末(30 日左右)。同时, 采用时域反射仪(Model TDR300, Specturm Company, Aurora, USA)测量附近 0—12 cm 范围内的土壤体积含水量, 每个测定点周围测量 3 次, 取平均值, 采用长杆电子温度探针(SK-250WP, Sato Keir-Yoki, Kanda, Japan)测定附近土壤 5 cm 深处的土壤温度。

2.2 数据处理

土壤呼吸日通量 R (g C/m²) 计算公式为:

$$R = R_s \times 3600 \times 24 \times 12 / 1000000 \quad (1)$$

运用以下模型分析土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量的关系:

$$R_s = aW + b \quad (2-1)$$

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

$$R_s = ae^{bt} W^c \quad (2-3)$$

式中, R_s 表示土壤呼吸速率, t 表示土壤 5 cm 深处温度, W 表示 0—12 cm 土壤含水量, a 、 b 、 c 为待定参数。

土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10}) 计算公式为:

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

式中, b 为(2-2)式中计算的常量。

运用 SPSS 19.0 进行数据分析,并用 Origin9.0 进行图形绘制,采用重复测量方差(repeated-measures ANONA)检验不同处理之间矿质土壤呼吸速率、温度、含水量的差异性,采用单因素方差(one-way ANONA)分析米楮次生林不同森林经营方式日平均碳排放通量的差异。

3 结果与分析

3.1 不同季节矿质土壤呼吸的昼夜动态特征

如图 1a 所示,各处理年均矿质土壤呼吸表现出 CK($2.18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)>RB($1.93 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)>RR($1.89 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)的趋势,但不同处理的矿质土壤呼吸在不同季节的变化趋势并不一致。CK 和 RB 矿质土壤呼吸速率表现为夏季高,冬季低;RR 矿质土壤呼吸速率则秋季最高,春季最低。春夏季,CK 和 RB 的矿质土壤呼吸显著高于 RR($p<0.05$);秋冬季 RR 的矿质土壤呼吸显著高于 CK 和 RB ($p<0.05$)(图 1a)。RR 的矿质土壤呼吸季节变化则与土壤温度出现了季节滞后效应(图 1b),CK 和 RB 的土壤含水量季节变化均呈现春季高,冬季低的趋势,RR 的土壤含水量春季最高,夏季最低(图 1c)。

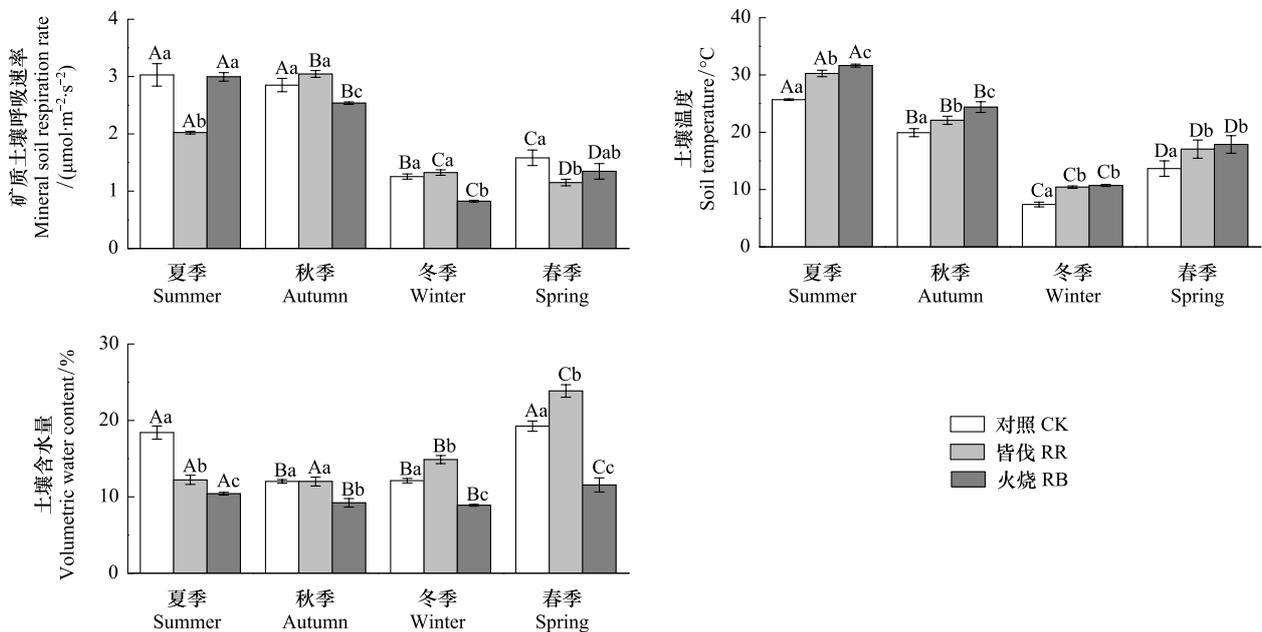


图 1 不同森林经营方式土壤 CO_2 速率、土壤温度和含水量的季节动态

Fig.1 Different forest management of mineral soil CO_2 rate, soil temperature and water content of seasonal dynamics

不同大写字母表示同一处理不同季节之间存在显著差异($p<0.05$),不同小写字母表示同一季节不同处理之间存在显著差异($p<0.05$),图中斜体 a、b 和 c 分别代表矿质土壤呼吸、土壤温度和土壤含水量,图中数据为平均值 \pm 标准差($n=3$)

矿质土壤呼吸的昼夜变化较大,不同季节的昼夜动态也不一致(图 2a, c, e 和 g)。CK 夏季矿质土壤呼吸速率最高值出现在早上 6 和晚上 22 点左右,最低值出现在 18 点左右,而秋、冬和春季节最高值出现于 17 点左右,而最低值出现在 8 点左右,其日变幅分别达到为 32%,40%,49%和 48%。RR 夏、秋、冬和春季节的矿质

土壤呼吸速率最高值出现于 6 点和晚上 23 点左右,最低值出现在 18 点左右,其日变幅分别达到为 54%, 26%, 77% 和 66%。RB 夏、秋、冬和春季节的矿质土壤呼吸速率最高值出现在 13 点左右,最低值出现在 6 点左右,其日变幅分别达到为 45%, 36%, 74% 和 89%。

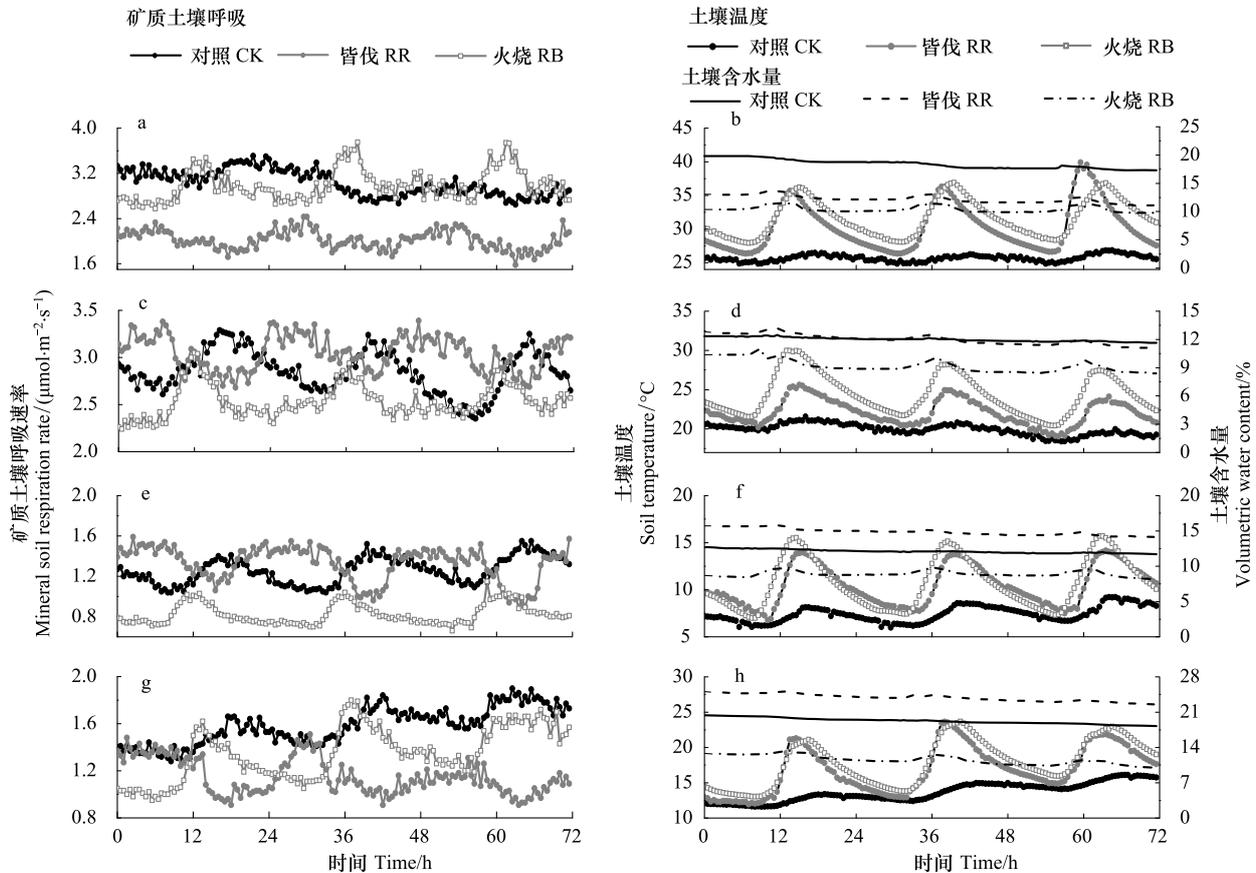


图 2 不同森林经营方式的矿质土壤呼吸速率、土壤温度和含水量的各季节的昼夜动态变化

Fig.2 Different forest management of mineral soil respiration rate, and soil temperature and moisture content of dynamic changes in different season

图中 a 和 b, c 和 d, e 和 f, g 和 h 分别表示不同森林经营方式下夏季、秋季、冬季和春季的矿质土壤呼吸速率与土壤温度和土壤含水量昼夜变化图

3.2 高频观测与手动观测 CO₂ 通量比较

如表 2 所示,与高频观测结果相比,CK、RR 和 RB 全年手动观测土壤呼吸年通量分别低估约 38%、15% 和 26%,而 9:00—11:00 时间段内采用高频自动观测系统观测值计算年通量与高频自动观测结果无显著差异。此外,如图 3 所示,CK 和 RB 手动观测的矿质土壤呼吸速率均低于高频自动观测,并存在显著差异($p < 0.05$),RR 手动观测的矿质土壤呼吸速率除秋季显著低于高频自动观测,在其他季节与其均无显著性差异($p > 0.05$)。CK、RR 和 RB 的 9:00—11:00 时间段内观测的土壤呼吸速率在不同季节中与高频观测的日平均呼吸速率均无显著差异($p > 0.05$) (表 2)。

3.3 不同森林经营方式下矿质土壤呼吸与温度和水分的关系

通过对全年数据分析发现,不同处理矿质土壤呼吸与土壤温度均呈极显著正相关($p < 0.01$),其中 CK ($R^2 = 0.90$) 和 RB ($R^2 = 0.90$) 的土壤呼吸与温度的相关性高于 RR ($R^2 = 0.22$) (表 3),但在不同季节表现略有不同。CK、RR 和 RB 处理在春季矿质土壤呼吸与土壤温度的相关性最高 (R^2 分别为 0.85, 0.54 和 0.79)。CK 处理的年均 Q_{10} 为 1.72,而 RR 处理显著降低 Q_{10} 值 (1.27),但 RB 处理则提高了 Q_{10} 值 (1.84)。与土壤温度相比,不同森林经营方式的矿质土壤呼吸与土壤含水量线性模型的相关性水平较差,仅在 RR 处理出现统计学上的

相关性(表 3),CK 与 RB 处理均与土壤含水量无显著相关性($P>0.05$)。此外,采用温度和含水量双因素模型分别共同解释 CK、RR 和 RB 的矿质土壤呼吸季节变化的 54.6—86.3%、25.3—59.4%和 32.5—75.9%,年变化的 96.8%、62.8%和 95.4%,拟合结果明显优于以温度或含水量为单因子的经验模型,且整体上显示 CK 和 RB 的矿质土壤呼吸与土壤温度和含水量的相关性更强(CK>RB),说明本研究地土壤温度与含水量在较大程度上共同影响着矿质土壤呼吸。

表 2 不同森林经营方式不同季节矿质土壤呼吸不同观测方式的日通量差异(g C/m^2)

Table 2 Different forest management in different seasons mineral soil respiration flux difference with different ways of observation

季节 Season	手动观测 Manual observation			9:00—11:00 点 观测数据 9:00—11:00 observation data			高频自动观测 High frequency automatic observation			手动与高频 自动观测的差异 The difference between manual and automatic observation			9:00—11:00 点与 高频自动观测的差异 The difference between 9:00—11:00 PM and automatic observation		
	CK	RR	RB	CK	RR	RB	CK	RR	RB	CK	RR	RB	CK	RR	RB
夏季 Summer	2.48	1.99	2.37	3.14	2.02	3.22	3.14	2.1	3.1	-21%	-5%	-24%	0%	-4%	4%
秋季 Autumn	1.49	1.84	1.73	2.77	3.03	2.77	2.95	3.16	2.63	-49%	-42%	-34%	-6%	-4%	5%
冬季 Winter	0.56	1.52	0.85	1.15	1.42	0.97	1.3	1.37	0.85	-57%	11%	-1%	-11%	4%	15%
春季 Spring	1.07	1.26	0.98	1.56	1.23	1.34	1.64	1.19	1.4	-35%	6%	-30%	-5%	3%	-5%
年均 annual average	1.4	1.65	1.48	2.16	1.92	2.08	2.26	1.96	2	-38%	-15%	-26%	-4%	-2%	4%

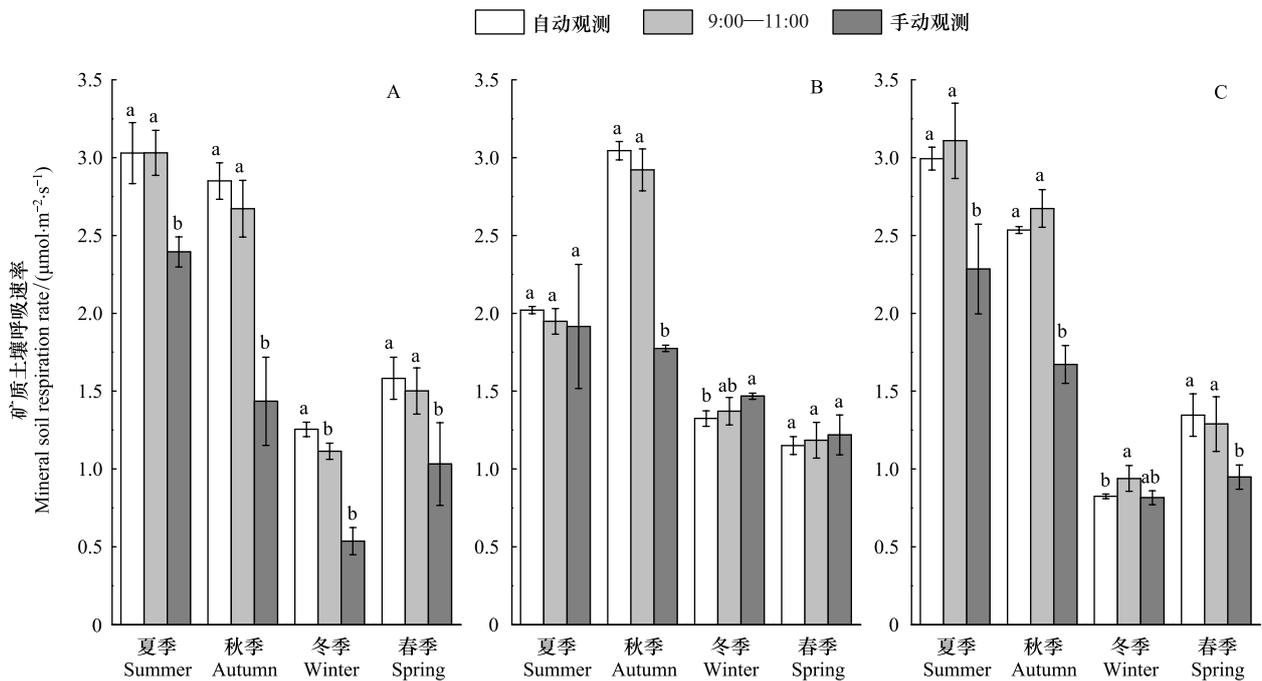


图 3 不同森林经营方式矿质土壤呼吸速率在不同观测方式的显著性

Fig.3 The significant of in different forest management of mineral soil respiration rate in different observation methods

A 图代表对照处理(CK),B 图代表皆伐处理(RR),C 图代表火烧处理(RB),不同小写字母表示同一处理同一季节不同观测方式之间存在显著差异($p<0.05$),图中数据为平均值 \pm 标准差($n=3$)

4 讨论

4.1 矿质土壤呼吸昼夜动态变化

本研究结果发现皆伐(RR)和火烧(RB)一年后矿质土壤呼吸低于对照(CK)(图 1a),可能与炼山措施和

水土流失造成土壤有机碳含量下降有关(表 1)。各季节 CK 和 RB 的矿质土壤呼吸昼夜呈单峰型变化,与 Zhao 等^[21]研究结果相同。RB 土壤呼吸速率日峰值出现于 13 点左右,最小值出现于 6 点左右,与土壤温度昼夜变化一致,国内外研究也得出类似结果^[22,23],表明 RB 的矿质土壤呼吸在昼夜尺度上的变化主要受土壤温度昼夜变化的驱动^[24]。CK 的矿质土壤呼吸在春、秋和冬季的矿质土壤呼吸峰值出现时间滞后于土壤温度(图 2c,b,e,f,g 和 h),可能与 CK 处理林冠覆盖较密,达到土壤微生物的最适温度和湿度需更长的时间有关。与其不同的是,CK 夏季的矿质土壤呼吸和 RR 整年的矿质土壤呼吸速率日峰值与土壤温度的相关性并不显著,反而随着土壤温度的上升其矿质土壤呼吸速率出现下降趋势(图 2),主要原因是在温度不是主要限制因子时,较低土壤含水量对矿质土壤呼吸起限制作用^[25,26]。本研究除夏季的 CK 处理外,RR 的土壤含水量均较高于 CK 和 RB,过高的土壤含水量导致土壤氧气含量下降,不利于土壤微生物活性,从而造成矿质土壤呼吸与土壤温度的滞后现象^[27,28]。

表 3 不同森林经营方式矿质土壤呼吸与土壤温度(T)和含水量(M)的关系

Table 3 The relationship between different forest management mineral soil respiration, soil temperature (T) and water content (M)

处理 Treatment	季节 Season	RS = ae^{bt}				RS = $aW + b$			Rs = $ae^{bt}W^c$			
		a	b	Q ₁₀	R ²	a	b	R ²	a	b	c	R ²
对照	夏季	9.94	-0.043	0.65	0.095**	0.21	-0.804	0.547**	0.06	0.007	1.28	0.546**
CK	秋季	0.51	0.087	2.39	0.590**	0.22	0.166	0.045*	56.31	0.120	-2.16	0.717**
	冬季	0.54	0.113	3.10	0.850**	-0.16	3.208	0.101**	0.10	0.119	0.66	0.863**
	春季	0.62	0.068	1.98	0.852**	-0.23	5.937	0.749**	0.19	0.075	0.38	0.841**
	年度	0.83	0.054	1.72	0.902**	0.02	1.821	0.010	3.27	0.057	-0.52	0.968**
	皆伐	夏季	3.11	-0.014	0.87	0.364**	0.03	1.631	0.016	1.88	-0.015	0.22
RR	秋季	4.63	-0.019	0.83	0.257**	-0.01	3.163	0.001	3.76	-0.019	0.08	0.253**
	冬季	2.16	-0.048	0.62	0.535**	0.10	-0.221	0.087**	1.48	-0.042	0.12	0.509**
	春季	1.83	-0.028	0.76	0.544**	0.09	-0.983	0.184**	0.16	-0.027	0.76	0.594**
	年度	1.07	0.024	1.27	0.223**	-0.11	3.599	0.473**	75.56	0.002	-1.40	0.628**
火烧	夏季	1.49	0.022	1.25	0.451**	0.31	-0.196	0.343**	0.23	0.018	0.85	0.647**
RB	秋季	1.77	0.015	1.16	0.308**	0.05	2.118	0.030*	1.38	0.014	0.11	0.325**
	冬季	0.59	0.030	1.35	0.466**	0.20	-0.946	0.588**	0.02	0.018	1.65	0.725**
	春季	0.58	0.047	1.60	0.786**	-0.06	2.016	0.053**	0.66	0.044	-0.04	0.759**
	年度	0.47	0.061	1.84	0.900**	0.03	1.623	0.006	6.80	0.059	-1.14	0.954**

* 表示达到显著水平(0.05), ** 表示达到极显著性水平(0.01)

4.2 手动观测与高频自动观测

手动观测和高频自动观测是目前土壤呼吸的主要两种观测方法。本研究发现,采用手动观测的结果对矿质土壤呼吸年通量进行估算,CK、RR 和 RB 分别比高频自动观测结果低估 38%, 15% 和 26%, 且各处理之间显著差异($p < 0.05$), 其主要原因是手动观测受观测频率限制, 导致手动观测所估算的矿质土壤呼吸平均日通量均小于高频自动观测结果^[29]。CK、RB 和 RR 的矿质土壤呼吸速率日平均值分别为 4:00—6:00, 7:00—9:00 和 8:00—10:00 之间(图 2a, c, e 和 g), 与森林、农业和沼泽生态系统土壤呼吸速率的日平均值的结果并不一致, 其认为土壤呼吸日平均值一般出现于 9:00—13:00 之间^[30,31,32]。因此, 若采用 9:00—13:00 之间的手动观测数据代替日平均值, 将大大低估矿质土壤呼吸日通量。但是, 高频自动观测 9:00—11:00 的矿质土壤呼吸速率平均值与高频自动观测日均值无显著差异($p > 0.05$), 主要是因为高频采样可以减小两者之间的误差。

4.3 矿质土壤呼吸与土壤温湿度关系

本研究 CK 和 RB 的矿质土壤呼吸与土壤温度均呈指数相关(表 3, $R^2 = 0.90$), 均在夏季达到最大值, 与其他亚热带森林样地土壤呼吸研究结果一致^[33,34]。然而, RR 的矿质土壤呼吸与土壤温度的相关性较低(表 3,

$R^2 = 0.22$), 这可能由于 RR 处理更新初期, 植物生长迅速, 土壤微生物对水分和养分的需求大于温度, 而我们的研究结果也表明 RR 的矿质土壤呼吸速率与土壤含水量相关性(表 3, $R^2 = 0.47$) 高于温度。与 RR 处理不同的是 CK 和 RB 的矿质土壤呼吸年均与土壤含水量均无显著线性相关(表 3, $p > 0.05$), 林内土壤含水量处于相对稳定状态^[35], CK 处理的土壤含水量日变幅均小于 RR 和 RB(图 2 b, d, f 和 h)。

相较于单一因子, 土壤温度与土壤湿度的双因子模型能更好解释土壤呼吸的变化^[36]。本研究期内土壤温度和含水量共同解释了 CK 和 RB 矿质土壤呼吸 97% 和 95% 的变化, 但 RR 土壤含水量和土壤温度却只解释了土壤呼吸速率 63% 的变化, 这表明皆伐地除温度和水分外, 可能还受其它因素的影响, 如皆伐地仍存在未分解完的采伐剩余物和新近死亡根系, 其所排放的 CO_2 并入矿质土壤呼吸。Karhu 等^[37] 认为, 土壤含水量有效性可以影响土壤呼吸的温度敏感性, 土壤温度敏感性与土壤含水量呈负相关性。本研究中皆伐后土壤含水量的增加和火烧后土壤含水量的降低(图 1c), 因此使矿质土壤呼吸的 Q_{10} 值呈现 $\text{RB}(1.84) > \text{CK}(1.72) > \text{RR}(1.27)$ 的趋势。

5 结论

皆伐和火烧的营林方式会显著降低矿质土壤呼吸速率, 并以火烧影响最大。采用手动观测的矿质土壤呼吸年平均日通量均低于高频自动观测的结果, 而采用高频观测 9:00—11:00 时间段内观测数据计算日通量与高频观测结果无显著差异。土壤温度和湿度可以共同解释次生林和火烧处理的矿质土壤呼吸大部分变化(97% 和 95%), 却仅能解释皆伐处理的矿质土壤呼吸部分变化(63%)。

因而, 采用高频自动观测方式对土壤呼吸进行观测, 不仅可以准确评估土壤呼吸与温度和水分的相关性, 而且还可以对日均、月均和年均土壤呼吸通量进行精确的评估, 并且能通过高频自动观测技术有可能可以量化不同生态系统的土壤呼吸的动态变化, 改进其经验模型。

参考文献 (References):

- [1] Tarnocai C, Canadell J G, Schuur E A G, Kuhry P, Mazhitova G, Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): GB2023.
- [2] Liang N S, Inoue G, Fujinuma Y. A multichannel automated chamber system for continuous measurement of forest soil CO_2 efflux. *Tree Physiology*, 2003, 23(12): 825-832.
- [3] Savage K E, Davidson E A. A comparison of manual and automated systems for soil CO_2 flux measurements: trade-offs between spatial and temporal resolution. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(384): 891-899.
- [4] Wang H, McConkey B, Curtin D, Cutforth H. Estimation of daily soil CO_2 flux using a single-time-point measurement. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90(3): 517-522.
- [5] Liu Q, Edwards N T, Post W M, Gu L, Ledford J, Lenhart S. Temperature-independent diel variation in soil respiration observed from a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, 2006, 12(11): 2136-2145.
- [6] Carbone M S, Vargas R. Automated soil respiration measurements: new information, opportunities and challenges. *The New Phytologist*, 2008, 177(2): 295-297.
- [7] Decina S M, Hutryra L R, Gately C K, Getson J M, Reinmann A B, Gianotti A G S, Templer P H. Soil respiration contributes substantially to urban carbon fluxes in the greater Boston area. *Environmental Pollution*, 2016, 212: 433-439.
- [8] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [9] Savage K, Davidson E A, Tang J. Diel patterns of autotrophic and heterotrophic respiration among phenological stages. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1151-1159.
- [10] Sayer E J, Tanner E V J. 2010. A new approach to trenching experiments for measuring root-rhizosphere respiration in a lowland tropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(2): 347-352.
- [11] Cusack D F, Torn M S, McDowell W H, SILVER W L. The response of heterotrophic activity and carbon cycling to nitrogen additions and warming in two tropical soils. *Global Change Biology*, 2010, 16(9): 2555-2572.
- [12] Craine J M, Gelderman T M. Soil moisture controls on temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition for a mesic grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(2): 455-457.

- [13] Wang G B, Zhou Y, Xu X, Ruan H H, Wang J S. Temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization along an elevation gradient in the Wuyi Mountains, China. *PLoS One*, 2013, 8(1): e53914.
- [14] 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.
- [15] Davidson E A, Samanta S, Caramori S S, Savage K. The dual Arrhenius and Michaelis - Menten kinetics model for decomposition of soil organic matter at hourly to seasonal time scales. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 371-384.
- [16] Page K L, Dalal R C, Raison R J. The impact of harvesting native forests on vegetation and soil C stocks, and soil CO₂, N₂O and CH₄ fluxes. *Australian Journal of Botany*, 2011, 59(7): 654-669.
- [17] Elliott K J, Vose J M. Initial effects of prescribed fire on quality of soil solution and streamwater in the southern Appalachian mountains. *Southern Journal of Applied Forestry*, 2005, 29(1): 5-15.
- [18] Kulmala L, Aaltonen H, Berninger F, Kieloahoc A J, Levulad J, Bäckb J, Harib P, Kolarib P, Korhonenb J F J, Kulmalac M, Nikinmaab E, Pihlatiic M, Vesalac T, Pumpanen J. Changes in biogeochemistry and carbon fluxes in a boreal forest after the clear-cutting and partial burning of slash. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 188: 33-44.
- [19] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3): 425-448.
- [20] 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.
- [21] Zhao J, Qi Y C, Dong Y S. Diurnal and seasonal dynamics of soil respiration in desert shrubland of *Artemisia Ordosica* on Ordos plateau of inner Mongolia, China. *Journal of Forestry Research*, 2007, 18(3): 231-235.
- [22] Wang M, Liu X T, Zhang J T, Li X J, Wang G D, Li X Y, Lu X R. Diurnal and seasonal dynamics of soil respiration at temperate *Leymus chinensis* meadow steppes in western Songnen plain, China. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(3): 287-296.
- [23] Shi W Y, Zhang J G, Yan M J, Guan J H, Du S. Diurnal and seasonal dynamics of soil respiration in a *Platycladus orientalis* forest stand on the semiarid Loess Plateau, China. *Journal of Earth Environment*, 2012, 3(6): 1144-1148.
- [24] Savage K, Phillips R, Davidson E. High temporal frequency measurements of greenhouse gas emissions from soils. *Biogeosciences Discussions*, 2013, 10(11): 18277-18308.
- [25] Vargas R, Baldocchi D D, Allen M F, Bahn M, Black T A, Collins S L, Yuste J C, Hirano T, Jassal R S, Pumpanen J, Tang J W. Looking deeper into the soil: biophysical controls and seasonal lags of soil CO₂ production and efflux. *Ecological Applications*, 2010, 20(6): 1569-1582.
- [26] Phillips C L, Nickerson N, Risk D, Bond B J. Interpreting diel hysteresis between soil respiration and temperature. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 515-527.
- [27] Vargas R, Allen M F. Diel patterns of soil respiration in a tropical forest after Hurricane Wilma. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113(G3): G03021.
- [28] Barron-Gafford G A, Scott R L, Jenerette G D, Huxman T E. The relative controls of temperature, soil moisture, and plant functional group on soil CO₂ efflux at diel, seasonal, and annual scales. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G1): G01023.
- [29] Savage K, Davidson E A, Richardson A D. A conceptual and practical approach to data quality and analysis procedures for high-frequency soil respiration measurements. *Functional Ecology*, 2008, 22(6): 1000-1007.
- [30] 蒋延玲, 周广胜, 赵敏, 王旭, 曹铭昌. 长白山阔叶红松林生态系统土壤呼吸作用研究. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 411-414.
- [31] Shi X H, Zhang X P, Yang X M, McLaughlin N B, Liang A Z, Fan R Q. An appropriate time-window for measuring soil CO₂ efflux: a case study on a Black soil in north-east China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2012, 62(5): 449-454.
- [32] Wang Y D, Wang H M, Wang Z L, Zhang W J, Guo C C, Wen X F, Liu Y F. Optimizing manual sampling schedule for estimating annual soil CO₂ efflux in a young exotic pine plantation in subtropical China. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 52: 41-47.
- [33] Tang X L, Liu S G, Zhou G Y, Zhang D Q, Zhou C Y. Soil-atmospheric exchange of CO₂, CH₄, and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China. *Global Change Biology*, 2006, 12(3): 546-560.
- [34] Wang W, Peng S S, Wang T, Fang J Y. Winter soil CO₂ efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of a forest-steppe ecotone, north China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(3): 451-458.
- [35] Heinemeyer A, Di Bene C, Lloyd A R, Tortorella D, Baxter R, Huntley B, Gelsomino A, Ineson P. 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. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1): 82-94.
- [36] Olajuyigbe S, Tobin B, Saunders M, Nieuwenhuis M. Forest thinning and soil respiration in a Sitka spruce forest in Ireland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157: 86-95.
- [37] Karhu K, Fritze H, Tuomi M, Vanhala P, Spetz P, Kitunen V, Liski J. Temperature sensitivity of organic matter decomposition in two boreal forest soil profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(1): 72-82.