

采伐对幕布山区毛竹林土壤呼吸的影响

唐晓鹿, 范少辉*, 漆良华, 刘广路, 官凤英, 杜满义, 许庆标

(国际竹藤中心, 竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102)

摘要:利用 LI-COR-8100 土壤 CO₂ 通量自动测量系统测定了湖北赤壁幕布山区采伐毛竹林土壤表面 CO₂ 通量及 5 cm 深度的土壤温度、湿度,研究了采伐对毛竹林土壤呼吸的影响,并用壕沟法区分各组分呼吸。结果表明:采伐显著增加了毛竹林的土壤温度,但对土壤湿度无显著影响;采伐能增加土壤呼吸、凋落物呼吸与矿质呼吸,但降低了根系呼吸;土壤总呼吸及组分呼吸与土壤温度呈指数相关 ($R^2 = 32.63\% \sim 84.50\%$),与土壤湿度呈线性相关 ($R^2 = 40.60\% \sim 93.50\%$),运用土壤温度、湿度复合模型能提高预测土壤呼吸的准确性 ($R^2 = 41.40\% \sim 96.20\%$)。采伐毛竹林土壤呼吸的增加主要因为采伐后土壤温度升高所致。

关键词:采伐;土壤呼吸;根系呼吸;凋落物呼吸;矿质呼吸;毛竹林

中图分类号:S795.7

文献标识码:A

Effect of Cutting on Soil Respiration in *Phyllostachy edulis* Forest, Mubushan, China

TANG Xiao-lu, FAN Shao-hui, QI Liang-hua, LIU Guang-lu, GUAN Feng-ying, DU Man-yi, XU Qing-biao

(Key Laboratory of Bamboo and Rattan, International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

Abstract: To determine the effect of cutting on soil respiration in *Phyllostachy edulis* forest, Mubushan, Hubei Province, the soil surface CO₂ flux, soil temperature and moisture at the depth of 5 cm were measured by LI-COR-8100 soil CO₂ flux system, and the trenching method was applied to separate the soil respiration of source components. The result showed that the soil temperature increased significantly after cutting, but the soil moisture did not change significantly; the total soil respiration, litter respiration and mineral respiration elevated after cutting, but the root respiration decreased. The soil respiration and source components respiration were exponentially related with the soil temperature ($R^2 = 32.63\% - 84.50\%$) and linearly related with the soil moisture ($R^2 = 40.60\% - 93.50\%$), respectively. However, the combined model of soil temperature and moisture could predict the variations of soil respiration more accurately ($R^2 = 41.40\% - 96.20\%$). The increase of soil respiration mainly resulted from the increase of soil temperature after cutting.

Key words: cutting; soil respiration; root respiration; litter respiration; mineral respiration; *Phyllostachy edulis* forest

土壤呼吸是指土壤释放 CO₂ 的过程,它包括 3 个生物学过程(根系呼吸、微生物对土壤有机质的分解和微生物呼吸、土壤动物呼吸)和一个非生物学过

程(含碳矿物质的化学氧化作用),是土壤环境中生物学和生物化学综合作用的结果^[1]。土壤呼吸是陆地生态系统与大气生态系统间碳交换的主要途径,

收稿日期:2012-05-23

基金项目:国家林业公益性行业科研专项“典型森林土壤碳储量分布格局及变化规律研究”(201104008);国际竹藤中心基本业务专项“毛竹林土壤有机碳时空格局与稳定性维持机制”(1632008005)及“基于毛竹林碳减量经营技术与碳计量参数研究”(1632010005);江西省财政林业重大专项“江西典型人工林生态系统碳循环特征及其调控技术”(2011511101)

作者简介:唐晓鹿(1986—),男,四川内江人,在读博士,主要从事竹林培育与竹林生态研究。

* 通讯作者:研究员,博导,主要从事竹林培育和竹林生态研究. E-mail: fansh@icbr.ac.cn

也是全球最大的碳通量之一,每年通过土壤呼吸释放到大气中的 CO_2 为 $(98 \pm 12) \text{Pg C}$, 是化石燃料释放 CO_2 的 10 多倍^[2], 因此,土壤呼吸的微小变化将对大气 CO_2 浓度产生重要影响,进一步反馈全球气候变化^[3];但土壤呼吸是一个复杂的生物化学过程^[1],因区域与植被类型不同,土壤呼吸研究结果也有较大差异^[4]。因此,加强不同区域及不同植被类型土壤呼吸研究对降低因大尺度土壤呼吸估算引起变异具有重要意义。

竹林是我国南方重要的森林资源,目前,我国竹林面积已经达到 538.10万 hm^2 , 其中,约 70% 为毛竹 (*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie) 林^[5]。竹林碳储量占我国森林总碳储量的 11% 左右,并随着竹林面积增加和经营利用有增加的趋势^[6]。在全球森林面积急剧下降的今天,竹林面积却以每年 3% 左右的速度在递增,这意味着竹林将是一个不断增大的碳汇。由于毛竹林具有生长快、周期短等特殊生物学特性,每年都进行采伐。采伐对毛竹林分质量^[7]、养分动态^[8] 及对土壤活性有机碳影响研究^[9] 已有报道,但对毛竹林土壤呼吸的影响还鲜见报道。因此,本研究以我国毛竹分布北缘的毛竹林为研究对象,研究采伐对毛竹林土壤呼吸及其水热因子的影响,为不同区域毛竹林土壤呼吸估算提供基础数据。

1 研究区概况

研究区位于湖北省赤壁市幕布山区丁母山林场 ($29^{\circ}28' \sim 29^{\circ}55' \text{N}$, $113^{\circ}32' \sim 114^{\circ}13' \text{E}$), 属亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,雨量充沛,年平均降水量 $1251 \sim 1608 \text{mm}$, 年最大降水量 2677.6mm , 年最小降水量 910.22mm , 降水多集中在 5—8 月。年平均气温 16.9°C , 无霜期 $247 \sim 261 \text{d}$ 。土壤主要为黄棕壤,由石灰岩、碳质页岩发育而来。本研究区毛竹林约 666.7hm^2 , 属于我国毛竹林北缘分布,多为毛竹纯林,林下有少许灌木和小乔木,主要有:鹅掌楸 (*Liriodendron chinense* Hemsl.)、盐肤木 (*Rhus chinensis* Mill.)、檫木 (*Loropetalum chinense* (R. Br.) Oliv.)、土茯苓 (*Smilax glabra* Roxb.)、毛板栗 (*Castanea mollissima* Mill.)、钩栲 (*Castanopsis tibetana* Hance) 等。

2 研究方法

2.1 样地设置

因区分土壤组分呼吸需要提前挖沟处理,故本

研究于 2011 年 5 月 17 日进行毛竹林样地选择并挖沟处理,8 月开始土壤呼吸测量。分别选择规格为 $20 \text{m} \times 20 \text{m}$ 的采伐样地 (I) 与对照样地 (II), 各 3 块,共计 6 块,林分内无灌木、小乔木与杂草。2011 年 8 月 13 日进行毛竹采伐,采伐强度为 $925 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 毛竹平均胸径为 9.7cm 。对照林分无采伐。除采伐外,林分无其他经营措施,采用便携式 GPS、罗盘仪等对样地立地因子和植被状况进行调查,主要指标包括:海拔、坡度、胸径、林分密度、树高和郁闭度等。样地基本情况及林理化性质见表 1。

表 1 样地基本情况

项目	样地类型	
	I	II
平均海拔/m	172	175
坡度/(°)	<5	<5
平均树高/m	11.1 ± 0.7	11.3 ± 0.6
平均胸径/cm	9.0 ± 0.2	9.3 ± 0.5
平均密度/(株 · hm^{-2})	3983 ± 112	3850 ± 66
郁闭度	0.9	0.9
土壤密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.28 ± 0.15	1.25 ± 0.12
总孔隙度/%	45.54 ± 4.65	45.55 ± 3.64
土壤有机质/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	26.76 ± 3.98	16.35 ± 3.14
土壤全氮/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.69 ± 0.20	1.48 ± 0.46
土壤有效钾/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	58.76 ± 13.21	60.33 ± 10.75
土壤有效磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	11.68 ± 3.04	11.75 ± 1.03

2.2 试验方法

土壤呼吸:利用 LI-COR-8100 土壤 CO_2 通量自动测量系统在原状土进行测量。在每块样地内随机布设 4 个 PVC 环(直径 20cm , 高 12cm), 永久性地插入原状土,呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 即为土壤总呼吸 R_s (保留根系 + 保留凋落物)。

凋落物呼吸:采用凋落物去除法,在每块样地内随机选取 4 个点,去除凋落物后,永久性地插入 4 个 PVC 环,测定去除凋落物后的呼吸速率 R_1 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 凋落物呼吸 R_l 为 R_s 与 R_1 之差(保留根系 + 移除凋落物)。

根系呼吸与矿质呼吸:因无法直接测量根系呼吸,故采用壕沟法间接测量。2011 年 5 月 17—18 日,在每块样地内随机选取一个 $80 \text{cm} \times 80 \text{cm}$ 的小样方,去除凋落物后,在小样方内挖 80cm 深的沟,插入 $80 \text{cm} \times 80 \text{cm}$ 铝塑板后,将挖出的土按原样填回,以切断竹根向小样地内生长,并在小样方内插入 2 个 PVC 环,呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 即为矿质呼吸 R_m (切断根系 + 去除凋落物), R_1 与 R_m 之差即

为根系呼吸 R_r 。

所有 PVC 环插入土壤深度为 3 cm, 每标准样地共 10 个 PVC 环, 土壤表面的 CO_2 通量均用 LI-COR-8100 土壤 CO_2 通量自动测量系统测量。因毛竹林年年采伐, 且次年 2—3 月竹笋萌动生长, 对土壤呼吸有较大影响, 故于 2011 年 8 月 13 日—2012 年 1 月 15 日, 每月中旬进行测量, 时间为 9:00—12:00, 此时测量值能更好地代表土壤呼吸日平均值^[10-11]。

土壤温度、湿度: 利用 LI-COR-8100 土壤 CO_2 通量自动测量系统自带的温度与湿度感应探针同时测量 5 cm 深度土壤温度、湿度。

土壤总呼吸与组分呼吸关系如下:

$$R_s = R_r + R_l + R_m$$

$$R_l = R_s - R_r; R_r = R_l - R_m \quad (1)$$

式(1)中: R_s 为土壤总呼吸, R_l 为凋落物呼吸, R_r 为根系呼吸, R_m 为矿质呼吸。

大量研究表明, 土壤呼吸与土壤温度呈较好的指数关系^[12-14], 因此, 本研究采用指数模型拟合土壤总呼吸及组分呼吸与土壤温度的关系, 即:

$$R = a \times e^{b \times T} \quad (2)$$

式(2)中: R 为土壤总呼吸或组分呼吸速率, a 、 b 为待定参数, T 为土壤温度, 因此, 土壤总呼吸及组分呼吸温度敏感性 Q_{10} 为:

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

2.3 数据分析

平均值计算与图表制作在 Excel 2003 软件中进行, 采用 SPSS 16.0 软件进行回归分析。

3 结果与分析

3.1 土壤温度、湿度变化规律

整个试验期间, 采伐林分(I)与对照林分(II)土壤温度、湿度的变化呈下降趋势(图1)。林分 I、

林分 II 土壤温度 8 月份最高, 分别为 33.89、33.58 $^{\circ}\text{C}$; 2012 年 1 月份最低, 分别为 3.43、3.93 $^{\circ}\text{C}$; 平均值分别为 17.76、16.51 $^{\circ}\text{C}$; 林分 I 土壤温度在生长季高于林分 II, 在非生物生长季低于林分 II, 差异均显著($p < 0.05$)。林分 I、林分 II 土壤湿度 8 月份最高, 分别为 30.71%、29.70%; 12 月份最低, 分别为 5.77%、6.50%; 平均值分别为 16.81%、16.08%, 二者土壤湿度的差异均不显著($p > 0.05$)。

3.2 土壤总呼吸与组分呼吸的变化规律

土壤总呼吸及组分呼吸同土壤温度与湿度的变化趋势一致, 随土壤温度与湿度的季节变化而表现出明显的季节变化特征(图2)。林分 I、林分 II 土壤总呼吸及组分呼吸 8 月时达到最大值, 次年 1 月时为最低值。土壤总呼吸的变化范围分别为 0.76~4.66、0.67~4.07 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值分别为 2.43、2.03 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 根系呼吸变化范围分别为 0.21~1.27、0.21~1.22 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值分别为 0.54、0.69 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 凋落物呼吸变化范围分别为 0.15~0.71、0.07~0.53 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值分别为 0.44、0.37 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 矿质呼吸变化范围分别为 0.22~2.97、0.27~2.33 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值分别为 1.44、0.99 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从变化趋势看, 土壤总呼吸及组分呼吸在 8—11 月时保持较高水平, 但 11 月后急剧下降, 可能是由气温的下降和毛竹生长停止引起。土壤总呼吸、凋落物呼吸与矿质呼吸均表现为林分 I > 林分 II, 差异均显著($p < 0.05$); 根系呼吸则为林分 II > 林分 I, 差异不显著($p = 0.204$), 表明采伐后毛竹林土壤总呼吸、凋落物呼吸与矿质呼吸速率呈增加趋势, 但根系呼吸速率呈下降趋势。

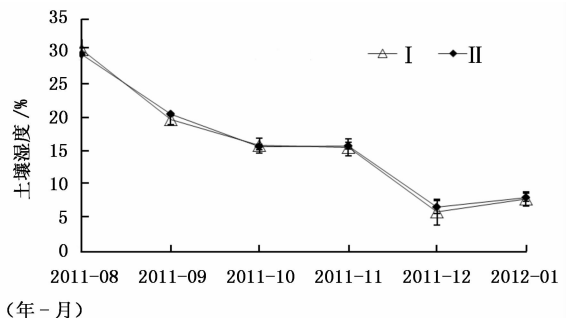
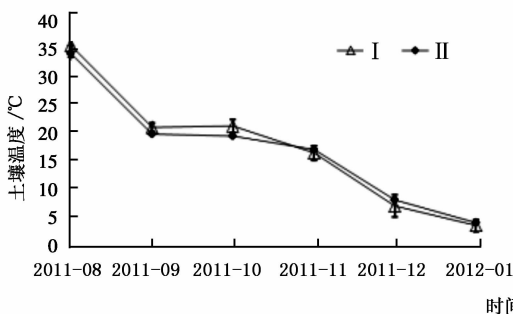


图1 5 cm 深度土壤温度和湿度的变化规律

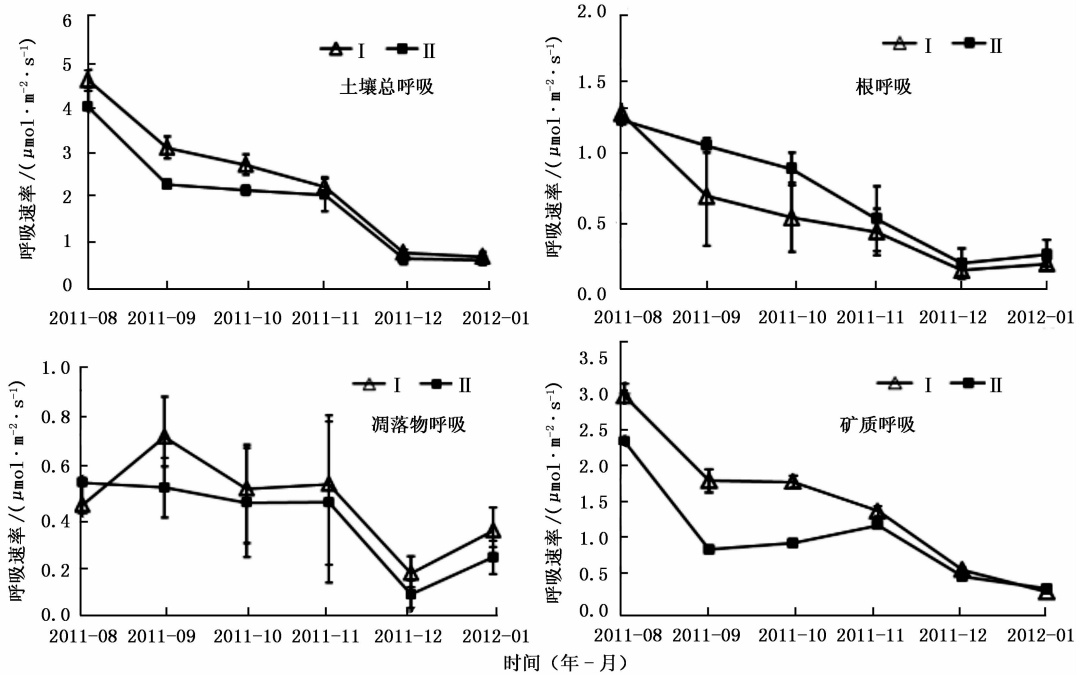


图 2 土壤总呼吸与组分呼吸变化规律

3.3 土壤总呼吸及组分呼吸与土壤温度的关系

土壤温度是土壤呼吸季节变化中最主要的控制因子。本研究表明:土壤总呼吸及组分呼吸与 5 cm 深度土壤温度呈极显著的指数相关(表 2)。土壤温度对土壤总呼吸、根系呼吸与矿质呼吸有很好的解释能力(70.92%~84.50%),对凋落物呼吸解释能力较弱(32.63%~38.93%)。林分 I 土壤总呼吸、根系呼吸与凋落物呼吸温度敏感性 Q_{10} 分别为

1.81、2.21 和 1.49,均低于林分 II,后者分别为 1.97、2.34 和 1.64,且根系呼吸温度敏感性均高于土壤总呼吸、凋落物呼吸温度敏感性,说明根生长更容易受到温度的影响。土壤矿质呼吸温度敏感性 Q_{10} 为林分 I (2.49) 显著高于林分 II (2.01),表明采伐能影响土壤总呼吸及组分呼吸的温度敏感性,但不同组分呼吸温度敏感性对采伐作业响应不同。

表 2 土壤总呼吸及组分呼吸与 5 cm 深度土壤温度的关系

项目	样地类型		
	I	II	
土壤总呼吸	回归方程	$R_s = 0.682 2e^{0.059 37T}$	$R_s = 0.515 5e^{0.067 97T}$
	R^2, p	0.802 6, 0.000	0.825 7, 0.000
	Q_{10}	1.81	1.97
根系呼吸	回归方程	$R_s = 0.110 7e^{0.079 57T}$	$R_s = 0.128 1e^{0.084 97T}$
	R^2, p	0.766 4, 0.000	0.709 2, 0.000
	Q_{10}	2.21	2.34
凋落物呼吸	回归方程	$R_s = 0.201 0e^{0.039 87T}$	$R_s = 0.175 5e^{0.049 77T}$
	R^2, p	0.326 3, 0.000	0.389 3, 0.000
	Q_{10}	1.49	1.64
矿质呼吸	回归方程	$R_s = 0.233 1e^{0.091 27T}$	$R_s = 0.246 2e^{0.070 07T}$
	R^2, p	0.828 2, 0.000	0.845, 0.000
	Q_{10}	2.49	2.01

3.4 土壤总呼吸及组分呼吸与土壤湿度的关系

除温度外,土壤湿度也是影响土壤总呼吸及组分呼吸的重要因子。本研究表明:土壤总呼吸及组

分呼吸与 5 cm 深度土壤湿度呈极显著的线性相关(表 3),表明在一定土壤湿度范围内,土壤呼吸随着土壤湿度的增加而增加。土壤湿度对土壤总呼吸、

根系呼吸与矿质呼吸有很好的解释能力(71.46%~93.50%),对凋落物呼吸解释能力弱于其他组分呼

吸,只能单独解释凋落物呼吸变异的40.60%~47.46%。

表3 土壤总呼吸及组分呼吸与5 cm深度土壤湿度的关系

项目	回归方程 R^2, p	样地类型	
		I	II
土壤总呼吸	回归方程	$R_s = 0.1617w - 0.2051$	$R_s = 0.1385w - 0.2764$
	R^2, p	0.7865, 0.000	0.9350, 0.000
根系呼吸	回归方程	$R_s = 0.0465w - 0.1975$	$R_s = 0.0495w - 0.1489$
	R^2, p	0.7738, 0.000	0.7146, 0.000
凋落物呼吸	回归方程	$R_s = 0.0163w + 0.2101$	$R_s = 0.0289w + 0.0437$
	R^2, p	0.4746, 0.000	0.4060, 0.015
矿质呼吸	回归方程	$R_s = 0.0969w - 0.2319$	$R_s = 0.0683w - 0.217$
	R^2, p	0.8256, 0.002	0.8328, 0.000

注: w 为5 cm深度土壤湿度,下同。

3.5 土壤总呼吸及组分呼吸与土壤温度、湿度复合关系

土壤呼吸是由多个影响因子及多个过程复合的结果,研究多因子的交互作用能更好地反应土壤呼吸的变化规律。本研究用复合模型模拟了土壤呼吸与土壤温度、湿度的关系(表4)。与单因子模型相

比,运用复合模型的决定系数 R^2 均有提高,土壤温度、湿度能联合解释土壤总呼吸及组分呼吸变异的41.40%~96.20%,但对土壤凋落物呼吸的解释能力较低,表明运用复合模型能提高预测土壤呼吸的准确性。

表4 土壤总呼吸及组分呼吸与土壤温度、湿度的复合关系

项目	回归方程 R^2	样地类型	
		I	II
土壤总呼吸	回归方程	$R_s = 0.202w^{0.478}T^{0.399}$	$R_s = 0.112w^{0.369}T^{0.654}$
	R^2	0.872	0.962
根系呼吸	回归方程	$R_s = 0.009w^{1.672}T^{-0.215}$	$R_s = 0.031w^{0.975}T^{0.127}$
	R^2	0.774	0.704
凋落物呼吸	回归方程	$R_s = 0.109w^{0.626}T^{-0.086}$	$R_s = 0.053w^{0.494}T^{0.326}$
	R^2	0.532	0.414
矿质呼吸	回归方程	$R_s = 0.060w^{0.297}T^{0.828}$	$R_s = 0.025w^{0.617}T^{0.659}$
	R^2	0.860	0.855

4 结论与讨论

(1)采伐降低了林分郁闭度,增加林分空隙,导致土壤温度与湿度的改变^[15]。本研究表明:采伐后,毛竹林土壤温度在生长季增加,在非生长季降低,其原因可能是密度降低,太阳光能更多直射到土壤表面,导致土壤温度升高;但在冬天,气温低于土壤温度,采伐后林分密度降低会加速大气与土壤热量交换,导致毛竹在非生长季温度降低。采伐对毛竹林土壤水分无显著影响,可能是采伐后增加地面蒸发与减少林分蒸腾相抵消,导致林分I与林分II土壤湿度无显著差异。

(2)试验期间,林分I、林分II土壤总呼吸的变

化范围分别为0.76~4.66、0.67~4.07 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值分别为2.43、2.03 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;根系呼吸变化范围分别为0.21~1.27、0.21~1.22 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值分别为0.54、0.69 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;凋落物呼吸变化范围分别为0.15~0.71、0.07~0.53 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值分别为0.44、0.37 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;矿质呼吸变化范围分别为0.22~2.97、0.27~2.33 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值分别为1.44、0.99 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。表明采伐作业增加了土壤总呼吸、凋落物呼吸与矿质呼吸,但降低了根系呼吸。Rustad等^[16]认为,采伐后土壤呼吸增加,可能原因是采伐后增加了死根或地上凋落物的分解,Fonte等^[17]也认为采伐后凋落物质量

的改变也能增加土壤呼吸;但本研究认为,采伐后土壤总呼吸增加是由于土壤温度增加引起,与 Concilio 等^[18]研究结果相似,因本研究进行采伐作业时,将整株毛竹清理出样地,并无剩余凋落物留于林分 I 内。另外,土壤总呼吸增加也可能由于土壤矿质呼吸增加引起的,采伐后林分地面温度升高,减少了地上碳供应,根际分泌物减少,导致土壤有机质的分解加速,增加土壤矿质呼吸;但根系呼吸降低可能是由于碳底物供应下降所导致的^[19]。

(3) 本研究表明,指数关系能很好地表示土壤总呼吸及组分呼吸与土壤温度的关系,与前人研究有本质相同之处^[15, 20];同时,本研究也表明,采伐虽然增加了土壤总呼吸,但降低了毛竹林土壤总呼吸温度敏感性,说明采伐毛竹林对缓解气候变化贡献比不采伐毛竹林更大。矿质呼吸及温度敏感性均增加,表明采伐后土壤有机质分解加速,可能会导致土壤有机碳储量变化,但凋落物分解加速也会增加土壤有机质输入。另外,采伐与其他经营措施联合运用更有助于稳定并提高毛竹林土壤碳储量。

(4) 土壤呼吸是一个综合过程,同时受到多个影响因子的控制,但在野外条件下,很难将各种影响因子分开,独立研究各影响因子对土壤呼吸的影响。研究所得的土壤总呼吸及各组分呼吸速率是受多个影响因子和控制过程综合影响的结果^[21]。无论研究土壤呼吸与土壤温度关系模型,还是土壤呼吸与土壤湿度关系模型,都会或多或少忽略其他因素的作用^[13, 22]。因此,运用复合模型能克服指数模型在土壤水分较低时对土壤呼吸的高估和土壤水分较高时对土壤呼吸的低估,能更好地预测土壤呼吸。

参考文献:

[1] Luo Y Q, Zhou X H. Soil respiration and the environment[M]. San Diego: Elsevier Academic Press Inc, 2006

[2] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 579 - 582

[3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623 - 1627

[4] 王 妮, 郭继勋. 松嫩草甸草地碱茅群落根系呼吸对土壤呼吸的贡献[J]. *科学通报*, 2006, 51(5): 559 - 564

[5] 贾治邦, 张建龙, 汪 绚, 等. 中国森林资源报告——中国第七次森林资源清查[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009

[6] 陈先刚, 张一平, 张小全, 等. 过去 50 年中国竹林碳储量变化

[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5218 - 5227

[7] 尹 洁, 张 喜, 彭培好, 等. 不同采伐强度对毛竹林分质量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(36): 18221 - 18223

[8] 蒋俊明, 刘大雷, 范少辉, 等. 川南毛竹林生态系统养分动态分析[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2010, 34(2): 31 - 36

[9] 马少杰, 李正才, 王 斌, 等. 不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2603 - 2611

[10] 王 超, 杨智杰, 陈光水, 等. 万木林保护区毛竹林土壤呼吸特征及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(5): 1212 - 1218

[11] 王 丹, 王 兵, 戴 伟, 等. 杉木生长及土壤特性对土壤呼吸速率的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(3): 680 - 688

[12] 杨庆朋, 徐摇明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. *生态学报*, 2011, 31(8): 2301 - 2311

[13] Yuste J C, Janssens I A, Carrara A, *et al.* Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest [J]. *Tree Physiology*, 2003, 23(18): 1263 - 1270

[14] Wieser G. Seasonal variation of soil respiration in a Pinus cembra forest at the upper timberline in the Central Austrian Alps[J]. *Tree Physiology*, 2004, 24(4): 475 - 480

[15] Tang J, Qi Y, Xu M, *et al.* Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada[J]. *Tree Physiology*, 2005, 25(1): 57 - 66

[16] Rustad L E, Melillo J M, Mitchell M J, *et al.* Effects of soil warming on C and N cycling in northern U. S. forest soils[M]//Mickler R, Birdsey R, Hom J. Responses of northern U. S. forests to environmental change. New York: Springer-Verlag, 2000

[17] Fonte S J, Schowalter T D. Decomposition of greenfall vs. senescent foliage in a tropical forest ecosystem in Puerto Rico[J]. *Biotropica*, 2004, 36(4): 474 - 482

[18] Concilio A, Ma S Y, Li Q L, *et al.* Soil respiration response to prescribed burning and thinning in mixed-conifer and hardwood forests[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(7): 1581 - 1591

[19] Ma S. Interactions between microclimate, soil respiration, and disturbances in a forest ecosystem: lessons from the teakettle experimental forest in California's Sierra Nevada[D]. OH, USA: The University of Toledo, 2003

[20] Peng Y, Thomas S C. Soil CO₂ efflux in uneven-aged managed forests: temporal patterns following harvest and effects of edaphic heterogeneity[J]. *Plant and Soil*, 2006, 289(1): 253 - 264

[21] Wieser G, Gruber A, Bahn M, *et al.* Respiratory fluxes in a Canary Islands pine forest [J]. *Tree Physiology*, 2009, 29(3): 457 - 466

[22] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 667 - 677