

## 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响\*

杨玉盛<sup>1</sup> 陈光水<sup>1</sup> 王小国<sup>2</sup> 谢锦升<sup>2</sup> 董彬<sup>2</sup> 李震<sup>2</sup> 高人<sup>1</sup>

(1 福建师范大学地理科学学院, 亚热带资源与环境省重点实验室, 福州 350007)

(2 福建农林大学林学院, 福州 350002)

**摘要** 应用密闭室碱吸收法对杉木人工林皆伐后的土壤呼吸及各分室呼吸进行为期 1 年定位研究, 结果表明, 杉木林皆伐后前 4 个月土壤呼吸显著高于对照(未伐地)的, 皆伐 6 个月后则显著低于对照的, 但伐后 1 年内的平均土壤呼吸则与对照的无显著差异。皆伐地枯枝落叶层呼吸和矿质土壤呼吸分别在伐后的 5 个月和 6 个月内显著高于对照的, 但此后则与对照的无显著差异。皆伐地根系呼吸除在伐后当月显著高于对照的外, 第 3 个月迅速降低至消失。皆伐地土壤呼吸、枯枝落叶层呼吸和矿质土壤呼吸最大值出现时间均较对照的有所提前。伐后 1 年内皆伐地枯枝落叶层呼吸、矿质土壤呼吸和根系呼吸占土壤呼吸的比例分别为 34.5%、63.9% 和 1.6%, 而对照的则分别为 23.4%、50.1% 和 26.5%。双因素关系模型拟合结果表明, 土壤温度和土壤湿度共同解释皆伐和对照土壤呼吸速率变化的 54% 和 90%。皆伐地土壤呼吸及各分室呼吸对土壤温度的敏感性低于对照的, 但对土壤湿度的敏感性则高于对照的。皆伐地土壤呼吸、矿质土壤呼吸和枯枝落叶层呼吸的  $Q_{10}$  分别为 1.42、1.53 和 1.34, 而对照的土壤呼吸、矿质土壤呼吸、枯枝落叶层呼吸和根系呼吸的  $Q_{10}$  则分别为 2.42、1.81、2.40 和 4.41。

**关键词** 皆伐; 土壤呼吸; 杉木; 土壤温度; 土壤湿度

中图分类号 S718.55 文献标识码 A

森林生态系统是陆地最大碳储存库, 其地上部分含 360~480 Pg C (占全球地上部分的 80% 左右), 地下部分含 790~930 Pg C (占全球地下部分的 40% 左右), 在全球 C 平衡中发挥着巨大的作用, 森林生态系统 C 汇及其受森林经营管理活动的影响是《京都议定书》中讨论的主要议题之一<sup>[1-3]</sup>。作为土壤 C 库最主要通量的土壤呼吸(约  $C\ 68 \pm 4\ Pg\ a^{-1}$ ), 它的微小变化不但会引起大气中  $CO_2$  浓度的明显改变, 更会影响森林土壤贮存 C 能力<sup>[2]</sup>。在过去的几十年里对土壤(包括森林土壤)呼吸及其影响因素进行了大量研究<sup>[1,4-8]</sup>, 但有关营林活动(特别是皆伐、火烧等)对森林土壤呼吸动态的影响研究较少, 且主要集中在温带森林<sup>[9-15]</sup>。本文探讨皆伐对中亚热带杉木人工林土壤呼吸动态的影响, 试图为科学评价营林措施对人工林 C 吸存的影响提供基础数据。

## 1 试验地概况

试验地位于福建农林大学南平西芹教学林场林学院后山(北纬  $26^{\circ}28'$ , 东经  $117^{\circ}57'$ ), 属中亚热带季

风气候, 年均气温  $19.3^{\circ}C$ , 年均降雨量为 1699 mm, 降雨多集中在 3~8 月份, 年均蒸发量 1413 mm, 年均相对湿度为 83%。1967 年人工营造杉木人工纯林。所设标准地均位于坡地的中下部, 坡度为  $20^{\circ}$ 。土壤为片麻岩发育的轻粘质红壤, 土层深 1 m 以上, 0~60 cm 土壤有机质含量为  $19.55\ g\ kg^{-1}$ , 全氮为  $0.69\ g\ kg^{-1}$ , 全磷为  $0.35\ g\ kg^{-1}$ 。杉木平均胸径 17.8 cm, 平均树高 17.5 m, 林分保留密度为  $970\ 株\ hm^{-2}$ , 郁闭度 0.83, 枯枝落叶层现存量  $3.12\ t\ hm^{-2}$ 。林下植被主要为芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)、观音座莲(*Angiopteris fokiensis*)和乌毛蕨(*Blechnum orientale*)等。

## 2 研究方法与分析

### 2.1 观测小区设置与皆伐处理

2002 年 10 月在即将皆伐杉木林和保留杉木林内建立 5 个  $20\ m \times 20\ m$  标准地, 在每个标准地内设置 4 种处理(每种处理小区面积为  $1\ m \times 1\ m$ )<sup>[9]</sup>, 即

\* 教育部高校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目

作者简介: 杨玉盛(1964~), 男, 教授, 博士。主要从事亚热带常绿阔叶林 C、N 循环研究。Tel: 0591-83483731; E-mail: geoyys@fjnu.edu.cn; geoyys@163.com

收稿日期: 2004-07-25; 收到修改稿日期: 2004-11-12

(1) 保留枯枝落叶层+ 保留根系; (2) 去除枯枝落叶层+ 保留根系; (3) 保留枯枝落叶层+ 切断根系; (4) 去除枯枝落叶层+ 切断根系。各处理重复 5 次。进行切断根系(挖壕沟)时,在小区四周挖掘 1m 深的壕沟后,用预制石棉瓦(1 m×1 m)贴在壕沟周围后将土回填,以阻止根系向小区内生长。在每个月下旬每天观测各小区土壤呼吸,连续观测 5~7 d。2003 年 2 月中旬对拟采伐地杉木林进行皆伐处理,皆伐地采伐剩余物数量为 9.87 t hm<sup>-2</sup>。皆伐后对对照(未伐地)和皆伐地土壤呼吸继续进行观测至 2004 年 1 月。

## 2.2 土壤呼吸测定方法

土壤呼吸测定采用密闭室碱吸收法。密闭室用马口铁皮(外涂白漆)自制,直径 20 cm,高 30 cm,下端开口。测定时,将内盛有 20 ml 1mol L<sup>-1</sup>的 NaOH 的玻璃瓶(未封口)放在离地面约 2 cm 的三角支架上,后扣上密闭室。使密闭室开口一端嵌入表层约 5 cm,并盖土砸实以防止漏气。放置 24 h 后,取出玻璃瓶,迅速封口后带回实验室,用标准盐酸溶液滴定。皆伐和对照地分别设 2 个空白(处理同上,但装碱液的瓶口是密封的),通过各处理的 CO<sub>2</sub> 吸收量减去空白的 CO<sub>2</sub> 吸收量以扣除密闭室内空气 CO<sub>2</sub> 的影响。每次同时测定每个观测点附近地表(5 cm)处地温和地表(0~10 cm)处土壤含水量。

## 2.3 土壤呼吸各分室计算

土壤呼吸= (保留枯枝落叶层+ 保留根系) 小区土壤呼吸

根系(含根际,下同)呼吸= (去除枯枝落叶层+ 保留根系) 小区土壤呼吸- (去除枯枝落叶层+ 切断根系) 小区土壤呼吸

枯枝落叶层呼吸= (保留枯枝落叶层+ 保留根系) 小区土壤呼吸- (去除枯枝落叶层+ 保留根系) 小区土壤呼吸

矿质土壤层呼吸= (去除枯枝落叶层+ 切断根系) 小区土壤呼吸

## 2.4 土壤呼吸模型构建

土壤呼吸速率  $R$  与土壤温度( $T$ ) 和土壤湿度( $W$ ) 关系的单变量模型和双变量模型分别如下:

$$R = ae^{bT}(cW + d)$$

$$R = ae^{bT}$$

$$R = cW + d$$

其中,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  和  $d$  为待定参数。

# 3 结 果

## 3.1 皆伐对土壤各分室呼吸的影响

杉木林皆伐地土壤呼吸速率在伐后前 4 月(2003 年 2 月至 5 月) 均显著高于对照地的( $p < 0.05$ ), 5 月时差异达最大(图 1, 表 1); 而 6 月时, 差异却不显著( $p > 0.05$ ), 此后皆伐地的土壤呼吸速率则显著低于对照的(表 1)。伐后 1a 内(2003 年 2 月~2004 年 1 月) 皆伐地与对照的平均土壤呼吸速率则无显著差异(表 1)。皆伐地与对照的土壤呼吸速率变化趋势相似, 但皆伐地土壤呼吸速率最高值出现在 5 月, 而对照的则出现在 6 月(图 1)。

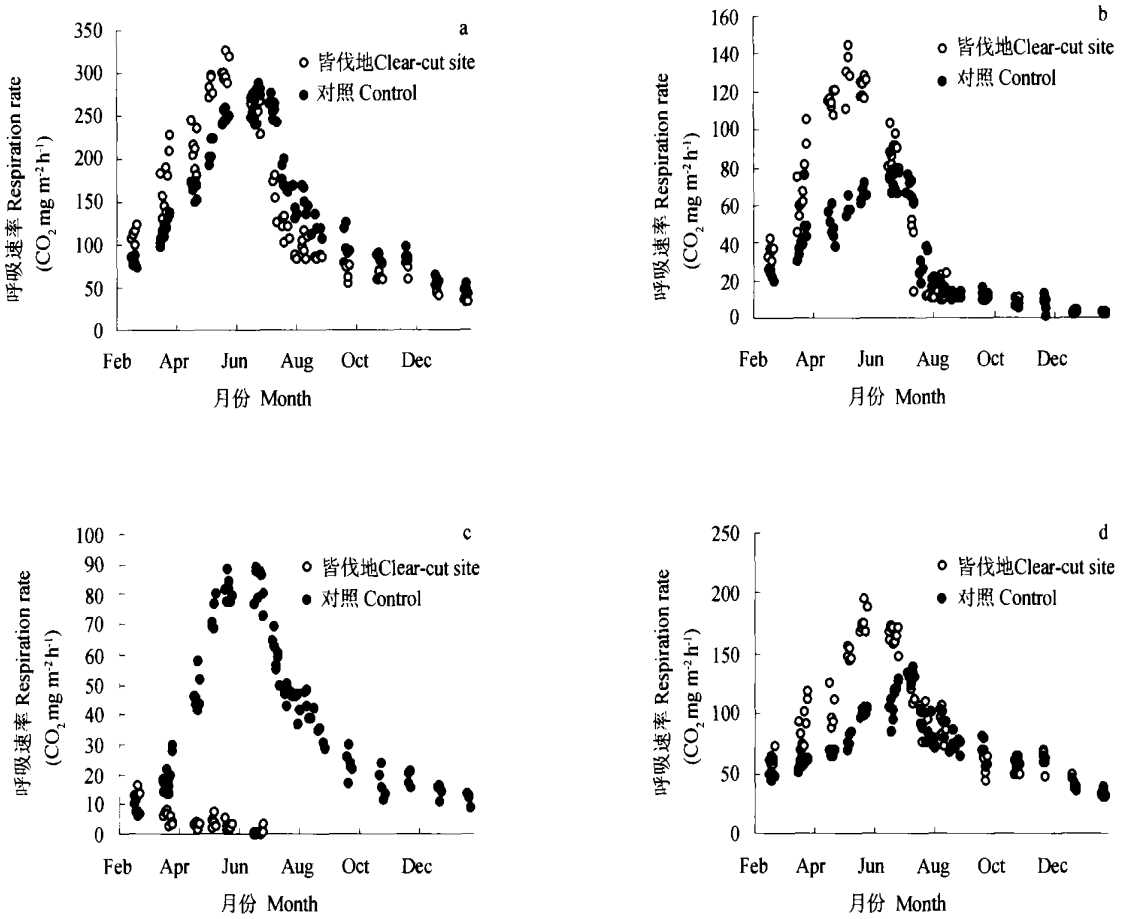
皆伐后矿质土壤层呼吸在伐后前 5 月(2003 年 2 月至 6 月) 显著高于对照( $p < 0.05$ ), 5 月时差异最大; 7 月后(含 7 月) 差异未达显著水平( $p > 0.05$ ); 伐后 1a 内皆伐和对照的平均矿质土壤层呼吸速率无显著差异(表 1)。皆伐后矿质土壤层呼吸最大值出现在 5 月, 而对照的则出现在 7 月(图 1d)。伐后 1a 内皆伐地矿质土壤呼吸占土壤呼吸比例的平均值比对照的高出 13.8% (表 1)。

皆伐地枯枝落叶层(含采伐剩余物) 呼吸在伐后前 6 月(2003 年 2 月至 7 月) 显著高于对照的( $p < 0.05$ ), 且在 5 月时差异最大; 8 月后(含 8 月) 则无显著差异( $p > 0.05$ ) (图 1b); 皆伐地平均枯枝落叶层呼吸则显著高于对照的( $p < 0.05$ ) (表 1)。皆伐地枯枝落叶层呼吸最大值出现在 5 月, 而对照的则出现在 6 月(图 1b)。皆伐和对照的枯枝落叶层呼吸占土壤呼吸比例均在春季最高, 而在夏秋季较低; 伐后 1a 内皆伐地枯枝落叶层呼吸占土壤呼吸比例的平均值比对照的高出 8.1% (表 1)。

皆伐后林木根系(含根际) 呼吸于采伐当月(2003 年 2 月) 显著高于对照, 这与伐后新近死亡细根分解有关; 此后迅速降低甚至消失(4 月)(图 1c)。对照的林木根系呼吸则以 2 月的最低, 6 月的最大, 而根系呼吸占土壤呼吸比例则在 5 月达最高值(表 1)。

## 3.2 土壤温度、土壤湿度与土壤呼吸的关系

皆伐和对照土壤呼吸及各分室呼吸与土壤温度和湿度(表 2) 关系可用模型  $R = ae^{bT}(cW + d)$  较好地拟合(表 3)。土壤温度和湿度共同解释了皆伐地和对照地土壤呼吸变化的 54% 和 90% (表 3)。若仅



a. 土壤呼吸 Soil respiration; b. 枯枝落叶层呼吸 Respiration of litter layer; c. 根系呼吸 Root respiration; d. 矿质土壤层呼吸 Mineral soil respiration

图1 皆伐及对照土壤呼吸各分室呼吸月动态

Fig. 1 Monthly variation in various compartment of soil respiration in the control site and the cut-over site in the Chinese fir plantation

表1 皆伐及对照土壤呼吸及各分室呼吸速率月变化

Table 1 Monthly variation in soil respiration and its compartment in the control site and cut-over site in the Chinese fir plantation

年份 Year	月份 Month	对照 Control				皆伐地 Clear-cut site			
		土壤呼吸 Soil respiration	矿质土壤层 呼吸 Mineral soil respiration	枯枝落叶层 呼吸 Respiration of litter layer	根系呼吸 Root respiration	土壤呼吸 Soil respiration	矿质土壤层 呼吸 Mineral soil respiration	枯枝落叶层 呼吸 Respiration of litter layer	根系呼吸 Root respiration
2003	Feb	81.4 ± 6.01a	50.3 ± 5.63a (61.8)	23.5 ± 2.44a (28.9)	7.63 ± 1.37a (9.4)	112 ± 8.39b	63.0 ± 5.91b (56.0)	36.2 ± 4.23b (32.2)	13.2 ± 1.84b (11.7)
	Mar	114.9 ± 10.3a	58.6 ± 4.31a (51.0)	38.4 ± 6.10a (33.4)	17.9 ± 2.29a (15.6)	153 ± 27.5b	79.4 ± 14.5b (51.9)	64.8 ± 11.4b (42.4)	8.81 ± 4.19b (5.8)
	Apr	158.6 ± 14.5a	67.0 ± 3.34a (42.2)	48.7 ± 6.84a (30.7)	43.0 ± 9.49a (27.1)	214 ± 20.8b	98.5 ± 20.7b (46.1)	112 ± 8.92b (52.3)	3.29 ± 0.82b (1.5)
	May	233 ± 23.2a	91.8 ± 13.1a (39.5)	62.7 ± 5.67a (27.0)	78.0 ± 6.12a (33.6)	295 ± 15.6b	166 ± 16.5b (56.2)	126 ± 9.38b (42.6)	3.41 ± 1.83b (1.2)
	Jun	269 ± 15.5a	108 ± 13.1a (40.1)	75.7 ± 7.12a (28.2)	85.2 ± 4.62a (31.7)	253 ± 7.44a	166 ± 5.55b (65.5)	87.0 ± 9.91b (34.3)	0.56 ± 0.30b (0.2)
	Jul	231 ± 44.5a	116 ± 21.0a (50.4)	57.4 ± 16.06a (24.9)	57.2 ± 10.7a (24.8)	154 ± 50.5b	116 ± 25.3a (75.1)	37.9 ± 26.2b (24.6)	2.14 ± 1.80b (1.4)

续表

年份 Year	月份 Month	对照 Control				皆伐地 Clear-cut site			
		土壤呼吸 Soil respiration	矿质土壤层 呼吸 Mineral soil respiration	枯枝落叶层 呼吸 Respiration of litter layer	根系呼吸 Root respiration	土壤呼吸 Soil respiration	矿质土壤层 呼吸 Mineral soil respiration	枯枝落叶层 呼吸 Respiration of litter layer	根系呼吸 Root respiration
	Aug	141 ± 19.4a	85.2 ± 12.6a (60.5)	16.4 ± 3.97a (11.7)	40.9 ± 5.57 (29.0)	93.5 ± 11.6b	81.4 ± 10.6a (87.1)	13.0 ± 5.07a (13.9)	
	Sep	103 ± 14.6a	66.5 ± 10.4a (64.4)	12.6 ± 2.53a (12.2)	24.1 ± 4.33 (23.4)	72.1 ± 10.8b	61.8 ± 10.9a (85.6)	10.4 ± 0.19a (14.4)	
	Oct	85.0 ± 4.76a	61.0 ± 3.79a (71.7)	7.10 ± 3.88a (8.4)	16.9 ± 4.97 (19.9)	62.1 ± 4.51b	51.5 ± 9.70a (82.9)	10.6 ± 0.34a (17.1)	
	Nov	87.4 ± 7.52a	61.5 ± 2.45a (70.4)	7.21 ± 4.88a (8.2)	18.7 ± 2.53 (21.4)	72.6 ± 9.78b	62.4 ± 9.84a (85.9)	10.2 ± 0.09a (14.1)	
	Dec	58.1 ± 4.37a	40.8 ± 3.60a (70.21)	3.13 ± 0.89a (5.38)	14.2 ± 2.45 (24.4)	45.2 ± 5.84b	42.1 ± 6.14a (93.2)	3.05 ± 0.79a (6.76)	
2004	Jan	48.5 ± 4.28a	34.1 ± 3.00a (70.27)	2.60 ± 0.74a (5.36)	11.8 ± 2.04 (24.4)	35.9 ± 3.55b	33.2 ± 3.63a (92.5)	2.70 ± 0.49a (7.52)	
	平均 Mean	158 ± 68.2a	79.1 ± 25.3a (50.1)	37.0 ± 18.1a (23.4)	42.2 ± 25.4a (26.5)	153 ± 82.1a	97.5 ± 33.0b (63.9)	52.7 ± 24.8b (34.5)	5.07 ± 4.64b (1.6)

注: 表中数据为平均值 ± 标准差, 括号内数值为其所占比例(%), 同一列中标有不同字母表示存在显著性差异( $p < 0.05$ ) Note: Figures are mean ± SD with a proportion to soil respiration (%) in the bracket. In a column the different letters indicate significant difference ( $p < 0.05$ )

考虑温度或湿度时, 土壤温度和土壤湿度仅分别解释了皆伐地土壤呼吸变化的 39% 和 23%, 对照的为 69% 和 43% (表 4)。皆伐地矿质土壤层呼吸的拟合

效果好于枯枝落叶层呼吸, 而对照的则以根系呼吸拟合效果最好, 矿质土壤层呼吸的最差(表 3)。

表 2 皆伐及对照土壤温度(°C)、土壤湿度(%) 月动态

Table 2 Monthly variation in soil temperature and soil humidity in the control site and the cut-over site in the Chinese fir plantation

处理 Treatment	月份 Month	2003											2004
		Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan
皆伐地 Clear-cut site	温度 Temperature	8.4 ± 0.4a	10.8 ± 0.6a	16.0 ± 0.8a	22.6 ± 0.9a	24.7 ± 1.0a	29.6 ± 0.7a	31.5 ± 1.4a	26.4 ± 0.7a	22.7 ± 1.0a	20.9 ± 0.3a	16.2 ± 1.4a	10.9 ± 1.1a
	湿度 Moisture	18.7 ± 0.5a	27.4 ± 0.9a	34.7 ± 1a	35.4 ± 1.2a	35.8 ± 2.0a	30.2 ± 1.0a	20.8 ± 1.9a	16.1 ± 1.2a	13.9 ± 0.4a	14.7 ± 0.2a	17.3 ± 1.7a	17.0 ± 0.3a
对照 Control	温度 Temperature	9.1 ± 0.6a	11.8 ± 0.7b	16.7 ± 0.7b	21.2 ± 1.0b	23.9 ± 1.1b	27.8 ± 0.4b	29.7 ± 1.3b	24.7 ± 0.5b	21.8 ± 0.9b	20.1 ± 0.5b	15.6 ± 1.4a	11.4 ± 1.3a
	湿度 Moisture	19.8 ± 1.0a	28.7 ± 0.8a	36.3 ± 0.9b	36.9 ± 1.2b	37.2 ± 1.9b	32.5 ± 1.1b	22.9 ± 1.3b	17.5 ± 1.3b	14.7 ± 0.8a	14.8 ± 0.2a	17.7 ± 2.0a	17.5 ± 0.8a

注: 表中数字为平均值 ± 标准差, 数字后字母不同表示有显著差异( $p < 0.05$ ) Note: Data are mean ± SD. The different letters that followed in the same column indicate significant difference at  $p < 0.05$

皆伐地土壤呼吸及各分室呼吸对土壤温度的敏感性(参数  $b$  和  $Q_{10}$ ) 均低于对照的, 其矿质土壤层呼吸对温度的敏感性高于枯枝落叶层的(表 3)。对照的根系呼吸对温度的敏感性最高, 其  $Q_{10}$  值约是矿质土壤层呼吸和枯枝落叶层呼吸的 2 倍(表 3)。皆伐地土壤呼吸及各分室呼吸对土壤湿度的敏感性(参数  $c$ ) 均高于对照的, 各分室呼吸中以枯枝落叶层呼吸对水分的敏感性最高(表 3)。

## 4 讨论

### 4.1 皆伐对土壤呼吸及各分室呼吸的影响

皆伐地在伐后第 3 个月根系呼吸接近于 0, 这与 Edmonds 等<sup>[9]</sup>、Fahey 等<sup>[10]</sup> 和 Ewel 等<sup>[11]</sup> 的研究结果相似, 而与 Weber 发现未成熟的杨树林分采伐对根系呼吸无显著影响的研究结果不同<sup>[12]</sup>。一般林木

表3 皆伐及对照土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度拟合模型( $ae^{bt}(cW+d)$ )参数Table 3 Parameters of the fitted model ( $ae^{bt}(cW+d)$ ) of soil respiration, soil temperature and soil humidity

处理 Treatment	呼吸分室 Compartment respiration	模型参数 Model parameters					
		a	b	c	d	R <sup>2</sup>	Q <sub>10</sub>
皆伐地 Clear-cut site	土壤呼吸 Soil respiration	1.237 6	0.035 2	2.728	-24.18	0.538 5	1.42
	矿质土壤层呼吸 Mineral soil respiration	0.786 6	0.042 3	1.935	-16.64	0.616 3	1.53
	枯枝落叶层呼吸 Litter-layer respiration	0.707 5	0.029 2	2.775	-33.65	0.325 2	1.34
对照 Control	土壤呼吸 Soil respiration	0.441 1	0.088 5	1.312	9.746	0.896 0	2.42
	矿质土壤层呼吸 Mineral soil respiration	0.431 9	0.059 5	0.059 0	45.28	0.780 9	1.81
	枯枝落叶层呼吸 Litter-layer respiration	0.169 0	0.087 5	1.321	-4.274	0.914 7	2.40
	根系呼吸 Root respiration	0.204 6	0.148 5	0.495 6	-9.025	0.855 7	4.41

表4 不同土壤呼吸模型比较

Table 4 Comparison between different models of soil respiration

处理 Treatment	R <sup>2</sup>		
	$ae^{bt}$	$cW+d$	$ae^{bt}(cW+d)$
皆伐地 Clear-cut site	0.390 1	0.227 0	0.538 5
对照 Control	0.692 2	0.429 0	0.896 0

根系呼吸可占土壤呼吸的10%~90%<sup>[13]</sup>,本研究观测期内皆伐地根系呼吸对土壤呼吸贡献仅为1.6%(表1),低于9年生(7%)和29年生(4%)湿地松人工林皆伐地的<sup>[14]</sup>,远低于落叶混交林皆伐地(63%~77%)<sup>[9]</sup>和北部云杉林的皆伐地(1/3)<sup>[15]</sup>,这可能与不同树种伐后根系的存活能力差异有关。另外,为进一步验证皆伐后杉木根系呼吸存活状况,对地表植被进行了定期清除(基本排除了地表植被根系呼吸),这可能是本研究中皆伐地根系呼吸所占比例低的又一原因。

森林土壤异养呼吸占土壤呼吸的比例一般为7%~83%<sup>[1]</sup>,而本研究中皆伐地土壤异养呼吸(含采伐剩余物呼吸)所占比例则高达98.4%(表1),这与皆伐地杉木根系存活期短、地表植被控制及伐后地表土温升高有关。

皆伐后根系呼吸和凋落物输入等的消失可降低土壤呼吸,而采伐剩余物的产生和分解及新近死亡根系的分解等则可促进土壤呼吸。因而,皆伐后土壤呼吸的变化是由导致土壤呼吸降低的因素和促进土壤呼吸增加的因素综合作用的结果。另外,由于皆伐地失去植被覆盖、地表裸露、太阳辐射增强和土壤水分蒸发增强等<sup>[16]</sup>,本研究中皆伐地除2003年2月、12月和2004年1月土壤温度与对照地的无显著差异外( $p > 0.05$ ),皆伐地均表现出表土温度升高的变化( $p < 0.05$ );而皆伐地2003年4月至9月的土

壤湿度亦显著低于对照的( $p < 0.05$ )(表2),这与Weber的研究结果相似<sup>[12]</sup>。皆伐地土壤温湿度的这种变化,在6月前(上半年)对土壤呼吸有一定促进作用,而在7~9月(高温少雨季节)则可能抑制土壤呼吸。本研究中杉木林皆伐后前4个月土壤呼吸均显著高于对照的(表1),这与落叶混交林皆伐后前3个月<sup>[9]</sup>、云杉林皆伐后前6个月<sup>[15]</sup>土壤呼吸高于对照的研究结果相似。这主要与皆伐地采伐剩余物和新近死亡根系的分解及土壤温度升高等对土壤呼吸的促进作用超过根系呼吸降低等有关。由于皆伐后地表温度升高,从而促进了枯枝落叶层和表层土壤有机质的分解;同时,皆伐给林地增加了大量新鲜采伐剩余物和新近死亡细根,为土壤微生物活动提供大量C源<sup>[17]</sup>,从而导致伐后枯枝落叶层和矿质土壤层呼吸的大幅度增加,这与Edwards等、Striegl和Wickland的研究结果相似<sup>[9,18]</sup>。而本研究中皆伐6个月后,皆伐地土壤呼吸显著低于对照的,这是皆伐地根系呼吸和凋落物输入消失及高温低湿等对土壤呼吸的降低作用超过采伐剩余物分解等对土壤呼吸的增加作用的结果。这主要与皆伐地采伐剩余物和土壤有机C的不断分解消耗及高温干旱的抑制作用,皆伐地枯枝落叶层呼吸和矿质土壤层呼吸不断下降与对照的相当接近有关(图1b,图1d)。

本研究中皆伐地土壤呼吸、采伐剩余物(含枯枝落叶层)呼吸和矿质土壤层呼吸的最大值出现时间

均比对照的有所提前,这与皆伐地失去林冠层覆盖、土壤温度升高较对照的快、土壤微生物活动的最适土壤温度和湿度出现时间提前有关。

本研究中皆伐后 1a 内平均土壤呼吸速率与对照的无显著差异,这与 jack pine 人工林皆伐后第 1 个生长季节内土壤呼吸与对照相比降低了 40% 的结果不同<sup>[18]</sup>,这主要与不同研究中采伐剩余物分解速率差异有关。本研究地处中亚热带,年均气温和降水量均较大,因而采伐剩余物可迅速大量分解,从而抵消了根系呼吸消失的影响,而使 1a 内皆伐地土壤呼吸与对照的无显著差异。而地处温带的 jack pine 林因年均气温较低,采伐剩余物分解缓慢,而无法抵消根系呼吸消失等导致的土壤呼吸降低的影响,因而其土壤呼吸在 1a 内仍较对照的低。

有关皆伐对土壤呼吸的长期影响目前报道不一,如 Weber 报道安大略省东部两个 aspen 林分皆伐后 2a 内土壤呼吸均下降<sup>[12]</sup>,Gordon 等报道白云杉林采伐后 3~4a 土壤 CO<sub>2</sub> 排放量仍显著高于未伐地<sup>[6]</sup>,而 Edmonds 等报道皆伐对长期土壤呼吸无显著影响<sup>[7]</sup>。虽然本研究时间仅为 1a,但由于采伐剩余物分解已近尾声,加上缺乏枯落物补充林地,可以预测本处理(杉木林皆伐地)近期内土壤呼吸将低于对照的;另外,由于皆伐地土壤呼吸中异养呼吸占很大比例,这将导致土壤 C 库的不断损失,这对林地的 C 库维护和提高是不利的。

#### 4.2 土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸季节变化的影响

目前土壤呼吸与土壤温度或土壤湿度的单变量关系模型报道较多,而揭示土壤温度和土壤湿度与土壤呼吸关系的双变量模型(如 GRESP, BRESP 和 FRESP 模型等)则较少<sup>[19~21]</sup>。本研究用  $ae^{bT}(cW+d)$  对土壤呼吸进行拟合显示,土壤温度和湿度共同解释杉木林土壤呼吸变化的 90% (表 4),这与土壤温度和湿度共同解释栎树矮林土壤呼吸的 91%,针叶林的 89%,桉树林的 97% 的研究结果相似<sup>[19~21]</sup>。但土壤温度和湿度共同仅解释了皆伐地土壤呼吸变化的 54%,这与皆伐地土壤呼吸除受土壤温度和湿度影响外,还受采伐剩余物和新近死亡根系的短期迅速分解及根系呼吸消失等的影响有关。但皆伐地和对照地土壤呼吸的双因素模型均优于仅单独考虑土壤温度的单变量模型,这与温度对土壤呼吸的作用受水分条件的限制有关<sup>[19~21]</sup>。本试验地 1 年中土壤湿度的变幅较大(皆伐地为 11.7%~39.0%,对照为 11.9%~41.3%),在 6 月之前,土壤含水量较

高(在 25% 以上),土壤呼吸主要受土壤温度限制;7 月之后,特别是 8~11 月土壤含水量低于 15%,此时土壤水分则成为重要的限制因子。

本研究中皆伐和对照的土壤呼吸及各分室呼吸的 Q<sub>10</sub> 值(表 3)均落入已报道的土壤呼吸 Q<sub>10</sub> 范围(1.3~5.6)<sup>[1,19~21]</sup>。对照的根系呼吸 Q<sub>10</sub> 值(4.4)远高于其他各分室呼吸的(表 3),这与美国 Massachusetts 的哈佛森林(Harvard Forest)中 85a 生温带混交林根系呼吸 Q<sub>10</sub> 值(4.6)高于矿质土壤(2.5)和全土(3.5)的结果相似<sup>[22]</sup>。根系(含根际)呼吸对温度的高敏感性可能与温度升高根系分泌物数量增加而促进根际微生物呼吸有关<sup>[22]</sup>。

#### 参考文献

- [1] 杨玉盛,董彬,谢锦升,等. 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. Yang Y S, Dong B, Xie J S, *et al.* Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 583~591
- [2] Dixon R K, Houghton R A. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185~190
- [3] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. 土壤学报, 2004, 41(1): 35~43. Xie X L, Sun B, Zhou H Z, *et al.* Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 35~43
- [4] 牟守国. 温带阔叶林、针叶林和针阔混交林土壤呼吸的比较研究. 土壤学报, 2004, 41(4): 564~570. Mu S G. Respiration of soils under temperate deciduous, coniferous and mixed forests (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 564~570
- [5] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71~90
- [6] Gordon A M, Schlentner R E, van Cleve K. Seasonal patterns of soil respiration and CO<sub>2</sub> evolution following harvesting in the white spruce forests of interior Alaska. *Can. J. For. Res.*, 1987, 17: 304~310
- [7] Edmonds R L, Marra J L, Bang A K, *et al.* Influence of forest harvesting on soil organisms and decomposition in western Washington. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep., 2000, 178: 53~72
- [8] Davidson B A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confound factors controlling soil respiration in a temperature mixed hardwood forest. *Global Change Biol.*, 1998, 4: 217~227
- [9] Edwards N T, Ross-Todd B M. Soil carbon dynamics in a mixed deciduous forest following clear-cutting with and without residue removal. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1983, 47: 1014~1021
- [10] Fahey T J, Hughes J W, Pu M, *et al.* Root decomposition and nutrient flux following whole-tree harvest in northern hardwood forest. *For. Sci.*, 1988, 34: 744~768
- [11] Ewel K C, Cropper W P Jr, Gholz H L. Soil CO<sub>2</sub> evolution in Florida

- slash pine plantations. ㊟ Importance of root respiration. *Can. J. For. Res.*, 1987, 17: 330~ 333
- [12] Weber M G. Forest soil respiration after cutting and burning in immature aspen ecosystems. *For. Ecol. Manage.*, 1990, 31: 1~ 14
- [13] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 林木根呼吸及测定方法进展. *植物生态学报*, 2004, 28(3): 426~ 434. Yang Y S, Dong B, Xie J S, *et al.* A review of tree root respiration: Significance and methodologies (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(3): 426~ 434
- [14] Bowden R D, Nadelhoffer K J, Boone R D, *et al.* Contributions of above ground litter, below ground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Can. J. For. Res.*, 1993, 23(7): 1 402~ 1 407
- [15] Lytle D E, Cronan C S. Comparative soil CO<sub>2</sub> evolution, litter decay, and root dynamics in clear-cut and uncut spruce-fir forest. *For. Ecol. Manage.*, 1998, 103: 121~ 128
- [16] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, *et al.* Effects of slash burning on nutrient removal and soil fertility in Chinese fir and evergreen broadleaved forests of mid-subtropical China. *Pedosphere*, 2003, 13(1): 87~ 96
- [17] Chen G S, Yang Y S, Xie J S, *et al.* Soil biological changes for a natural forest and two plantations in subtropical China. *Pedosphere*, 2004, 14(3): 297~ 304
- [18] Striegl R G, Wickland K P. Effects of a clear-cut harvest on soil respiration in a jack pine-lichen woodland. *Can. J. For. Res.*, 1998, 28: 534~ 539
- [19] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, *et al.* Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biol.*, 2002, 8(9): 851~ 866
- [20] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO<sub>2</sub> efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains. *Plant Soil*, 2001, 237(1): 15~ 23
- [21] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest. *Plant Soil*, 1997, 190(1): 127~ 141
- [22] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396: 570~ 572

## EFFECT OF CLEAR-CUTTING ON SOIL RESPIRATION OF CHINESE FIR PLANTATION

Yang Yusheng<sup>1</sup> Chen Guangshui<sup>1</sup> Wang Xiaoguo<sup>2</sup> Xie Jinsheng<sup>2</sup> Dong Bin<sup>2</sup> Li Zhen<sup>2</sup> Gao Ren<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Fujian Key Lab. of Subtropical Resources and Environments, College of Geography Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

(<sup>2</sup> College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract** Effect of clear-cutting on soil respiration was investigated in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation in Fujian Province for one year (from February 2003 to January 2004) following clear-cutting. Soil respiration was measured in situ utilizing the alkali sorption technique. During the first 4 months clear-cutting significantly increased soil respiration level, which dropped drastically in the following 6 months, while there was no significant difference in mean soil respiration rates during the study periods between the clear-cut site and the control site (intact site). Respiration rates of forest floor and mineral soils in the clear-cut site were significantly higher than in the control site during the first 5 and 6 months, and there were no significant differences thereafter. Root respiration rate in clear-cut site declined rapidly and disappeared after the 3 months, and was only significantly higher than in the control site during the first month. The contributions to total CO<sub>2</sub> evolution from forest floor respiration, mineral soil respiration and root respiration in clear-cutsite were 34.5%, 63.9% and 1.6%, and were 23.4%, 50.1% and 26.5% in control site, respectively. Soil temperature and soil moisture together accounted for 54% and 90% of variations of the soil respirations in the clear-cut and the control sites. Soil respiration and its compartments in the clear-cut site were lower in temperature sensitivity but higher in moisture sensitivity than in the control site. Q<sub>10</sub> values for total soil respiration, mineral soil respiration, and forest floor respiration was 1.42, 1.53, and 1.34, respectively, in the cut site and 2.42, 1.81, and 2.40, respectively, in the control site. Root respiration of the control site was the highest in Q<sub>10</sub> value, being as high as 4.41.

**Key words** Clear-cutting; Soil respiration; Chinese fir; Soil temperature; Soil moisture