

格氏栲天然林与人工林土壤异养呼吸特性及动态*

杨玉盛¹ 陈光水¹ 谢锦升² 王小国² 牛志鹏² 韩永刚² 张有利²

(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 通过用静态碱吸收法对中亚热带福建三明格氏栲自然保护区内的格氏栲天然林和 33 年生的格氏栲人工林及杉木人工林的土壤异养呼吸进行为期 2 年的定位研究。结果表明, 三种森林枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸速率季节变化均呈单峰曲线, 最大峰值出现在 5 月至 6 月, 最小值出现在 12 月至 1 月。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林枯枝落叶层呼吸速率平均值分别为 CO_2 79.88、44.37 和 21.02 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 无根土壤呼吸速率平均值分别为 CO_2 217.4、85.85 和 94.04 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。2002 年枯枝落叶层呼吸速率和无根土壤呼吸速率主要受土壤温度影响, 但在极端干旱的 2003 年则主要受土壤湿度的影响。双因素关系模型 ($R = ae^{bT}W^c$) 拟合结果优于仅考虑土壤温度或土壤湿度的单因素关系模型, 土壤温度和土壤湿度共同解释不同年份枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸速率季节变化的 82%~85% 和 85%~92%。不同森林枯枝落叶层呼吸对土壤温度和湿度的敏感性均高于无根土壤呼吸的。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林枯枝落叶层呼吸年通量分别为 C 3.76、2.63 和 1.23 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$, 无根土壤呼吸年通量则分别为 C 3.44、2.79 和 1.49 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。不同森林土壤异养呼吸通量的差异主要与枯落物数量和质量、土壤有机质数量和质量差异有关。杉木林枯枝落叶层呼吸对干旱敏感性高于格氏栲(天然林和人工林)的, 而人工林(杉木和格氏栲)的土壤有机 C 对干旱敏感性则要高于格氏栲天然林。

关键词 天然林; 人工林; 土壤异养呼吸; 土壤温度; 土壤湿度

中图分类号 S153.61 文献标识码 A

森林土壤异养呼吸是指森林土壤在微生物参与下的矿质化过程, 一般包括根际微生物呼吸、无根土壤(矿质土壤)呼吸和枯枝落叶层呼吸, 它是土壤呼吸的重要组成部分^[1]。由于土壤动物的异养呼吸数量不大, 因而森林生态系统的异养呼吸主要表现为土壤异养呼吸。土壤异养呼吸是森林生态系统碳(C)库的主要损失途径, 是森林生态系统 C 平衡的重要分量之一, 与净初级生产力(Net primary production, NPP)一起共同决定了森林的 C 汇大小(即净生态系统生产力, Net ecosystem production)。由于森林在维护全球 C 平衡及减缓大气 CO_2 浓度升高中起着重要的作用, 因而森林 C 汇功能的动态变化及科学预测引起了人们的极大关注。虽然有关森林土壤呼吸的研究较多且历史较长, 但森林土壤异养呼吸的研究则相对较少, 从而直接影响到森林 C 平衡的研究及全球变化背景下(如全球变暖、降水量变

化、土地覆盖变化等)森林 C 汇变化的科学预测^[1]。

我国中亚热带常绿阔叶林是全球同纬度特有的重要森林类型, 具有较高的生物量和生产力, 在全球陆地生态系统 C 贮存中发挥着重要贡献。长期以来, 大面积天然林通过皆伐、炼山和整地等传统营林措施而改为群落结构简单、树种单一的针叶树人工林^[2]。这种森林转换对生态系统 C 吸存的影响如何? 已引起了人们的高度关注, 但目前缺乏相关的研究。

位于福建三明莘口的格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)保护区内格氏栲天然林是目前世界上树龄(约 150 a 以上)和面积(700 hm^2)较大, 保存较为完整的中亚热带天然常绿阔叶林。20 世纪 60 年代, 部分格氏栲天然林曾被皆伐后营造诸如杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、福建柏(*Fokienia hodginsii*)、格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)、木荚红豆

* 教育部高校优秀青年教师奖项目、福建省重大基础研究项目(2000F004)、教育部重点科研项目

作者简介: 杨玉盛(1964~), 男, 汉族, 福建仙游人, 博士, 教授。主要从事亚热带常绿阔叶林 C、N 等元素循环的研究。E-mail: geoyys@

fjnu.edu.cn

收稿日期: 2004-12-17; 收到修改稿日期: 2005-04-12

树(*Ormosia xylocarpa*)等人工纯林,这些人工林与现存格氏栲天然林毗邻,本底条件(母岩、土层厚度、土壤层次)相似,从而为天然林和不同人工林的生态学比较提供良好的条件。作者已对格氏栲天然林和人工林凋落物、细根、枯枝落叶层C库和养分库、土壤非保护性有机C、土壤呼吸对干湿交替的响应、土壤生物学活性进行过报道^[3~8],本文探讨森林转换对土壤异养呼吸动态的影响,为进一步研究天然林转换为人工林对生态系统C平衡和C吸存的影响机

理及合理的森林C吸存经营措施的采取提供依据。

1 试验地概况^[3~8]

试验地位于福建省三明市莘口镇,试验地2002年、2003年及多年平均(1961~1990年)降水量和气温见图1,试验地其他自然概况及格氏栲天然林(NF)、格氏栲人工林(CK)和杉木人工林(CF)林分特征、土壤性质参见文献^[3~8]。

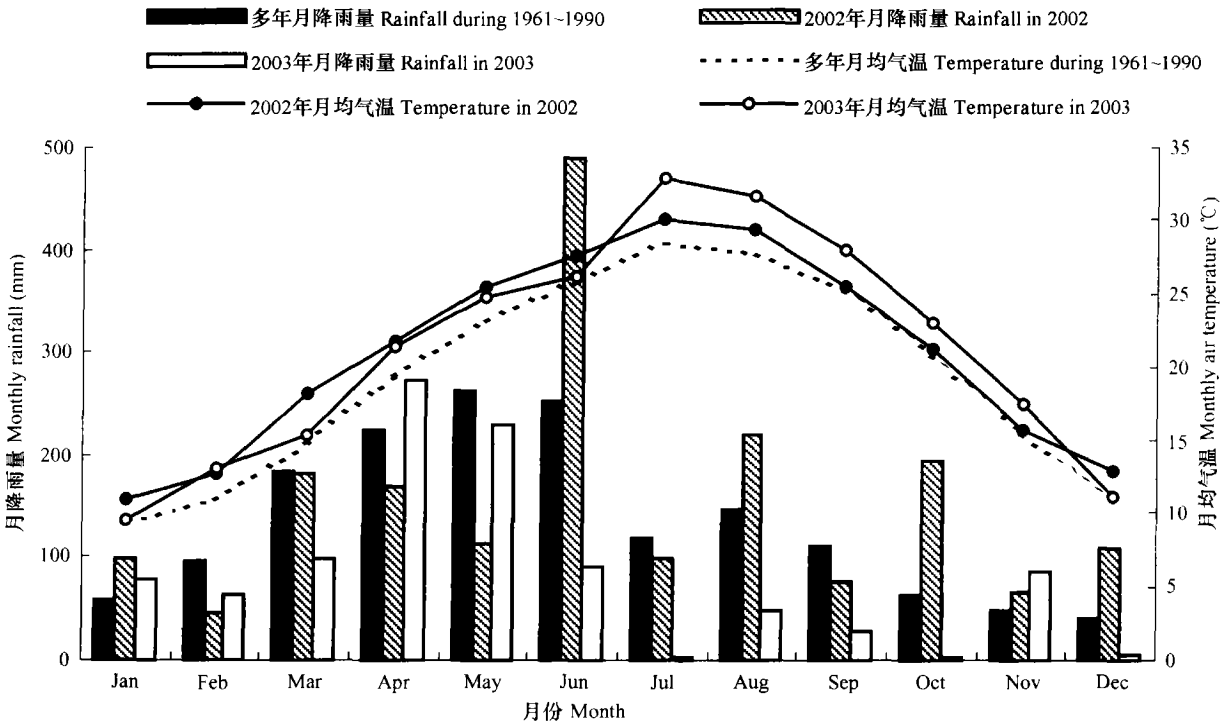


图1 试验地2002年、2003年及30年(1961~1990)平均月降水量和月均气温

Fig. 1 Monthly rainfall and air temperature in 2002 and 2003 and during 1961~1990

2 研究方法

2.1 观测小区设置

在格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林的各3块20 m × 20 m标准地中分别设置4种处理(每种处理小区面积为1 m × 1 m)^[9],即(1)保留枯枝落叶层+保留根系;(2)去除枯枝落叶层+保留根系(原状土);(3)保留枯枝落叶层+切断根系;(4)去除枯枝落叶层+切断根系。各标准地处理重复5次,每种林分15个重复。进行切断根系(挖壕沟)时,在小区四周挖掘1 m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。从2002年1月开始至2003年12月,在每个月下旬每天观测各小区土壤呼吸,连续观测5~7 d。

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测定。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 1 mol L⁻¹的NaOH的玻璃瓶(未封口)放在离地面约2 cm的三脚支架上,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。每次同时测定每个标准地地表(5 cm)地温和地表(0~10 cm)土壤含水量(烘干法),共重复

3 次^[10]。

2.3 土壤异养呼吸计算

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

无根土壤呼吸= (去除枯枝落叶层+ 切断根系) 小区土壤呼吸

2.4 土壤异养呼吸模型构建

土壤异养呼吸速率 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:

$$R = ae^{bT}W^c$$

$$R = ae^{bT}$$

$$R = cW + d$$

其中 a 、 b 、 c 和 d 为待定参数。

2.5 土壤异养呼吸年通量计算

每月连续测定的枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸的平均值代表该月平均枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸速率, 通过累加求得当年枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸年通量。

3 结果与分析

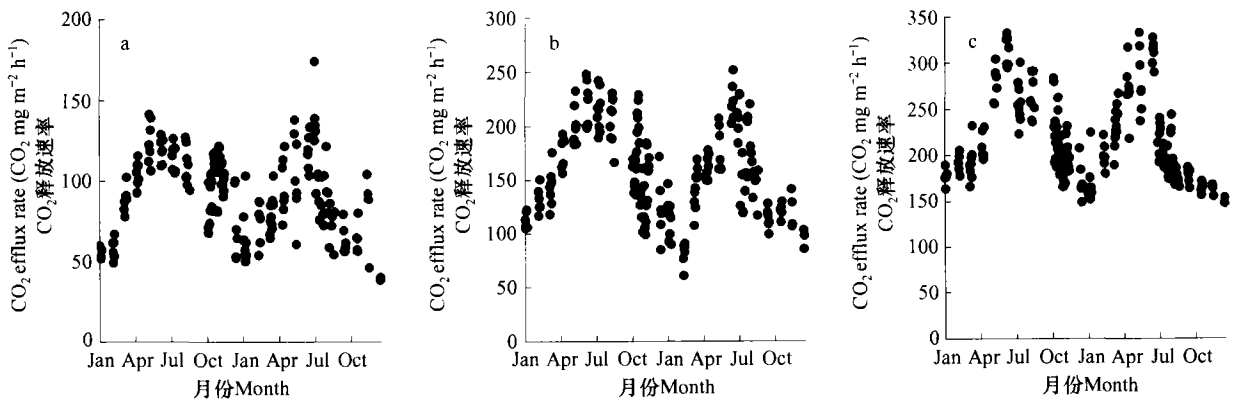
3.1 土壤异养呼吸季节动态

不同森林无根土壤呼吸和枯枝落叶层呼吸季节变化规律大体相似, 均在春末夏初(5月下旬或6月下旬) 达到最大值, 而在冬季(12月至1月) 出现最小值(CF 和 CK 的枯枝落叶层呼吸速率最低值接近

于0)(图2; 图3)。NF、CK 和 CF 无根土壤呼吸速率平均值分别为 CO_2 217.4、85.85 和 94.04 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 变化范围则分别为 CO_2 147.5~ 332.8 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、32.63~ 156.4 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 和 49.14~ 174.2 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。这表明无根土壤呼吸总体上受各自土壤有机 C 含量控制, 同时, 随年内土壤温度和湿度变化而波动。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林枯枝落叶层呼吸速率平均值分别为 CO_2 79.88、44.37 和 21.02 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 变化范围则分别为 CO_2 13.95~ 190.7 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、0.38~ 130.2 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 和 0.20~ 93.90 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 枯枝落叶层呼吸速率则总体上受其枯枝落叶层贮量控制^[5], 同时随年内温度和湿度变化而波动。

3.2 土壤温度和土壤湿度的影响

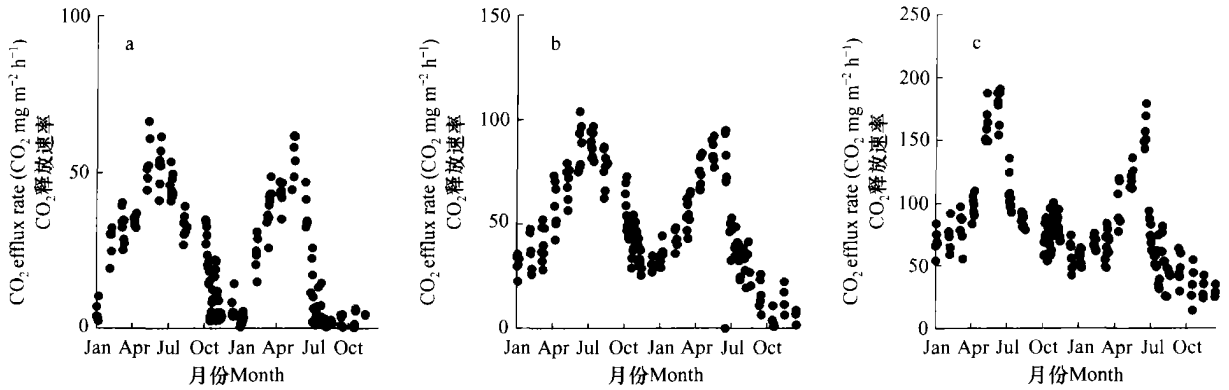
采用双因素关系模型($R = ae^{bT}W^c$), 土壤温度和土壤湿度共同解释了不同森林 2002 年、2003 年枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸速率季节变化的 82%~ 85% 和 85%~ 92% (表 1); 若仅考虑单因素模型($R = ae^{bT}$ 或 $R = aW + b$) 时, 土壤温度仅分别解释了不同森林 2002 年、2003 年枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸速率变化的 33%~ 55% 和 30%~ 53%, 土壤湿度则仅分别解释 31%~ 72% 和 27%~ 80% (表 1), 表明亚热带森林土壤异养呼吸速率受土壤温度和土壤湿度的共同影响。2002 年不同森林枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸速率与土壤温度的相关性均高于土壤湿度, 而 2003 年不同森林枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸速率与土壤温度的相关性则均低于土壤湿度的(表 1)。



a. 杉木人工林 *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir, CF) plantation; b. 格氏栲人工林 *Castanopsis kawakamii* plantation (CK); c. 格氏栲天然林 Native *Castanopsis kawakamii* forest (NF)

图2 不同森林类型无根土壤呼吸季节动态

Fig. 2 Season dynamic of mineral soil respiration in different forests



a. 杉木人工林 *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir, CF) plantation; b. 格氏栲人工林 *Castanopsis kawakamii* plantation (CK);
c. 格氏栲天然林 Native *Castanopsis kawakamii* forest (NF)

图3 不同森林类型枯枝落叶层呼吸季节动态

Fig. 3 Season dynamic of respiration of litter-layer in different forests

表1 不同森林土壤异养呼吸与土壤温度和湿度关系模型参数

Table 1 Model parameters of soil heterotrophic respiration

年份 Year	森林类型 Forest type	各分室 ¹⁾ Compartment	$R = ae^{bT}$		$R = aW + b$		$R = ae^{bT}W^c$	
			r^2	r^2	a	b	c	r^2
2002	NF	R _L	0.56	0.39	2.238	0.046	0.831	0.82
		R _{RF}	0.53	0.41	27.72	0.034	0.444	0.92
	CK	R _L	0.45	0.31	0.706	0.069	0.833	0.83
		R _{RF}	0.42	0.27	11.02	0.035	0.430	0.85
	CF	R _L	0.55	0.36	0.178	0.099	0.929	0.85
		R _{RF}	0.52	0.41	10.59	0.037	0.544	0.92
2003	NF	R _L	0.34	0.68	1.202	0.031	1.084	0.84
		R _{RF}	0.36	0.72	29.01	0.017	0.529	0.92
	CK	R _L	0.35	0.68	0.356	0.030	1.332	0.85
		R _{RF}	0.33	0.74	14.36	0.014	0.548	0.92
	CF	R _L	0.33	0.72	0.018	0.037	2.057	0.85
		R _{RF}	0.30	0.52	6.621	0.017	0.721	0.92

1) R_{RF}: 无根土壤呼吸 Respiration of root-free soil; R_L: 枯枝落叶层呼吸 Respiration of litter layer

表1中的 $R = ae^{bT}W^c$ 模型参数 b(温度敏感性因子)和参数 c(湿度敏感性因子)大小顺序均为枯枝落叶层呼吸 > 无根土壤呼吸,表明枯枝落叶层呼吸对土壤温度和湿度的敏感性均高于无根土壤呼吸的。CF的枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸的参数 b和参数 c均高于NF和CK(表1),CF土壤异养呼吸的年变化幅度亦远高于NF和CK(图2;图3),表明CF土壤异养呼吸对温度和湿度变化的响应更为敏感(表1),这可能与不同森林土壤微生物组成、群落结构和树种差异有关。

与2002年相比,2003年不同森林枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸对土壤湿度的敏感性(参数c)均明显增加,而对土壤温度敏感性(参数b)则有所降低,其中以CF的R_L变化最为明显(表1),表明降水量减少或气温升高对枯枝落叶层呼吸的影响杉木林(针叶林)是远大于阔叶林(格氏栲人工林和天然林)的。

3.3 土壤异养呼吸年通量

NF的土壤异养呼吸分别为CK和CF的1.3倍和2.7倍,CK的土壤异养呼吸则是杉木人工林的

2.0 倍(表 2)。NF 的无根土壤呼吸和枯枝落叶层呼吸年通量分别为 CK 的 1.2 倍和 1.4 倍, 而分别为 CF 的 2.3 倍和 3.1 倍(表 2); CK 的无根土壤呼吸和枯枝落叶层呼吸则分别为 CF 的 1.9 和 2.1 倍。

不同森林土壤异养呼吸占土壤呼吸的比例以

CF 的最高(59.8%), 而 NF 的则最低(52.4%)。土壤异养呼吸中无根土壤呼吸和枯枝落叶层呼吸所占比例较为接近, 但 NF 土壤异养呼吸中枯枝落叶层呼吸略占优势, 而 CK 和 CF 则以无根土壤呼吸略占优势(表 3)。

表 2 土壤异养呼吸 CO₂ 年释放量¹⁾

Table 2 Annual CO₂ flux from soil heterotrophic respiration in the NF, CK and CF (C t hm⁻² a⁻¹)

年份 Year	R _H			R _{RF}			R _L		
	NF	CK	CF	NF	CK	CF	NF	CK	CF
2002	7.72± 0.87aA	5.98± 0.60bA	2.98± 0.32cA	3.64± 0.35aA	3.04± 0.43bA	1.63± 0.22cA	4.09± 0.44aA	2.94± 0.34bA	1.36± 0.17cA
	6.69± 0.75aB	4.87± 0.54bB	2.45± 0.30cB	3.25± 0.34aB	2.54± 0.36bB	1.35± 0.17cB	3.44± 0.40aB	2.33± 0.32bB	1.09± 0.12cB
平均 Mean	7.20± 0.86a	5.43± 0.56b	2.72± 0.34c	3.44± 0.40a	2.79± 0.38b	1.49± 0.22c	3.76± 0.46a	2.63± 0.33b	1.23± 0.16c

1) R_H: 土壤异养呼吸 Soil heterotrophic respiration; R_{RF}: 无根土壤呼吸 Respiration of root-free soil; R_L: 枯枝落叶层呼吸 Respiration of litter layer
数据为平均值±标准差; 同一行数据后的小写字母不同表示有显著差异($p < 0.05$), 同一列数据后的大写字母不同表示有显著差异($p < 0.05$)
Data are mean±SD. Different small letters in the same row and different capital letters in the same column indicate significant different at $p < 0.05$ level

表 3 土壤异养呼吸占土壤呼吸的比例¹⁾

Table 3 Contributions of soil heterotrophic respiration to soil respiration in the NF, CK and CF (%)

森林类型 Forest type	R _H /R _S	R _{RF} /R _S	R _L /R _S	R _{RF} /R _H	R _L /R _H
NF	52.4	25.1	27.4	47.8	52.2
CK	57.5	29.6	27.9	51.5	48.5
CF	59.8	32.8	27.0	54.8	45.2

1) R_H: 土壤异养呼吸 Soil heterotrophic respiration; R_S: 土壤呼吸 Soil respiration; R_{RF}: 无根土壤呼吸 Respiration of root-free soil; R_L: 枯枝落叶层呼吸 Respiration of litter layer

4 讨论

4.1 土壤异养呼吸季节动态及土壤温度和湿度的影响

土壤异养呼吸受温度、湿度、植被类型(地上和地下枯落物数量和质量)、土壤性质(土壤活性有机 C、土壤微生物数量和组成、土壤排水状况)等影响, 表现出强烈的时空变异性^[1, 11, 12]。本研究用 $ae^{bT}W^c$ 对土壤呼吸进行拟合显示, 土壤温度和湿度解释 2002 年、2003 年无根土壤呼吸和枯枝落叶层呼吸变化的 82%~92%(表 1), 这与一般报道土壤呼吸主要受土壤温度和湿度共同影响的结果相一致^[9, 13, 14]。双因素模型明显优于仅考虑土壤温度的单因素模型, 特别在亚热带 7~9 月份气温高、降水量少(图 1)、土壤含水量较低, 此阶段若使用单因素模型推算土壤呼吸年通量, 精度将较难保证。

本研究 2002 年和 2003 年土壤异养呼吸速率与土壤温度、土壤湿度相关性差异与不同年份降水量和气温差异有关(表 1, 图 1)。2002 年的降水量(1865 mm)和年均气温(20.9℃)与该地 30 年平均降水量(1606 mm)和平均气温(19.4℃)相近(图 1), 该年度不同森林土壤异养呼吸各分室与土壤温度的相关性均高于土壤湿度的(表 1), 表明该地森林土壤异养呼吸速率主要受土壤温度的影响(仅土壤温度可单独解释 42%~56%), 这与亚热带其他研究者报道结果相似^[15~17]。而 2003 年降水量(1002 mm)远低于该地 30 年平均降水量, 且年均气温(21.2℃)高于 30 年平均气温, 是该地极端干旱年份。该年度土壤异养呼吸速率明显受土壤湿度影响, 仅土壤湿度即可解释土壤异养呼吸各分室变化的 52%~74%(表 1)。其中, 2003 年的 6~10 月降雨量仅为 170.8 mm, 与多年平均和 2002 年同期降雨量(分别为 693.8 mm 和 1080 mm)相比分别降低了

75% 和 84%。不同森林 2003 年 6~10 月与 2002 年相比, 该时段的平均土壤温度升高 $1.7^{\circ}\text{C} \sim 2.8^{\circ}\text{C}$, 平均土壤湿度下降了 $10.8\% \sim 14.5\%$ (表 4)。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林 2003 年 6~10 月无根土壤呼吸总量分别比 2002 年同期降低了 32%、35% 和 44%, 枯枝落叶层呼吸总量则降低了 43%、46% 和 40% (表 4), 表明 2003 年土壤异养呼吸通量的下降主要发生在该持续干旱时段内。然而, 不同森林 2003 年的土壤异养呼吸通量显著低于 2002 年, 这除了主要与干旱有关外, 亦可能与由于切断了根系和去除枯枝落叶层, 从而导致易分解有机物质数量逐年减少有一定关系。

持续干旱亦对土壤温度、土壤湿度与土壤异养呼吸的关系产生影响。从表 5 可见, 与 2002 年的相

比, 2003 年 6~10 月土壤异养呼吸与土壤温度的相关性明显降低, 而与土壤湿度的相关性则显著增加, 表明持续干旱期间土壤异养呼吸主要受土壤湿度调控。这与 Rout 和 Gupta^[18] 在印度北部西瓦利克山脉研究森林土壤呼吸时, 发现在一个长期相对高温的环境或者是在明显的季节性干旱时期, 仅利用土壤湿度作为变量就可以对土壤呼吸大小进行模型预测 (仅土壤湿度就能解释土壤呼吸变化的 76%) 的结果相似。与 2002 年相比, 2003 年 6~10 月不同森林类型土壤双因素模型的相关系数均有所降低, 且温度敏感性显著降低, 格氏栲天然林的参数 b 甚至出现负值 (表 5); 而湿度敏感性则显著提高。这与一些研究发现土壤呼吸的温度敏感性随水分的升高而增强的结果相似^[19-21]。

表 4 2002 年和 2003 年 6~10 月土壤异养呼吸与 5 cm 处平均土壤温度和土壤湿度^{D)}

Table 4 Soil heterotrophic respiration, mean soil temperature and soil water content at 5 cm depth during June to October in 2002 and 2003

年份 Year	森林类型 Forest type	土壤温度 Soil temperature ($^{\circ}\text{C}$)	土壤湿度 Soil water content (%)	R_{RF} (C t hm^{-2})	R_{L} (C t hm^{-2})
2002	NF	21.1	34.8	1.69	2.16
	CK	21.5	32.5	1.48	1.64
	CF	21.9	29.1	0.79	0.63
2003	NF	23.9	20.3	1.15	1.24
	CK	23.8	19.0	0.96	0.89
	CF	23.6	18.3	0.44	0.38

1) R_{RF} : 无根土壤呼吸 Respiration of root-free soil; R_{L} : 枯枝落叶层呼吸 Respiration of litter layer

表 5 2002 年和 2003 年 6~10 月土壤异养呼吸速率 (R) 与土壤温度 (T) 和湿度 (W) 不同关系模型参数

Table 5 Parameters of different soil heterotrophic respiration models during June to October in 2002 and 2003

年份 Year	森林类型 Forest type	各分室 ^{D)} Compartment	$R = ae^{bT}$	$R = aW + b$	$R = ae^{bT}W^c$			
			r^2	r^2	a	b	c	r^2
2002	NF	R_{L}	0.48	0.31	2.98	0.0496	0.708	0.87
		R_{RF}	0.56	0.37	21.9	0.0263	0.539	0.87
	CK	R_{L}	0.52	0.47	1.05	0.0584	0.896	0.90
		R_{RF}	0.51	0.43	8.53	0.0410	0.591	0.88
	CF	R_{L}	0.46	0.33	0.146	0.0811	1.10	0.82
		R_{RF}	0.46	0.36	4.12	0.0507	0.643	0.87
2003	NF	R_{L}	0.36	0.65	2.22	-0.0267	1.34	0.72
		R_{RF}	0.29	0.61	44.3	-0.0064	0.570	0.74
	CK	R_{L}	0.33	0.54	0.514	0.0236	1.53	0.81
		R_{RF}	0.21	0.61	12.8	0.0124	0.624	0.81
	CF	R_{L}	0.12	0.58	0.0015	0.0111	2.83	0.78
		R_{RF}	0.24	0.55	5.86	0.0157	0.803	0.75

1) R_{RF} : 无根土壤呼吸 Respiration of root-free soil; R_{L} : 枯枝落叶层呼吸 Respiration of litter layer

4.2 土壤异养呼吸年通量及森林转换的影响

本研究中格氏栲天然林土壤异养呼吸年通量与我国热带林的($C 6.93 t hm^{-2} a^{-1}$)相似,但高于我国常绿、常绿落叶阔叶林($C 4.90 t hm^{-2} a^{-1}$),格氏栲和杉木人工林的则均分别低于我国的硬叶常绿阔叶林($C 3.92 t hm^{-2} a^{-1}$)和暖性针叶林($C 3.75 t hm^{-2} a^{-1}$)^[22]。本研究不同森林土壤异养呼吸占土壤呼吸的比例均落入热带和温带森林生态系统范围(30%~83%)^[23~25]的中间位置。NF 和 CK 的土壤异养呼吸占土壤呼吸比例与成龄橡木林(*Quercusbra*)的(48%)^[26]相似,而无根土壤呼吸占土壤呼吸比例则低于栎树矮林(*Coppice oak forest*)的(55%)^[9]。本研究枯枝落叶层呼吸占土壤呼吸比例则均低于温带阔叶混交林的(37%)^[22],但均高于尖峰岭热带森林(9.9%和1.7%~2.8%)^[27, 28]。

不同森林土壤异养呼吸年通量差异主要与呼吸底物数量和质量有关^[29, 30]。本研究中不同森林土壤温度和土壤湿度差异未达显著水平,但与 CK 和 CF 相比,NF 具有更高的凋落物和枯死细根 C 归还量和质量、更高的土壤有机 C 贮量和质量(非保护性有机 C 含量较高)^[3, 4, 6],从而有利于促进土壤微生物数量和活性的提高^[8],进而促进了土壤异养呼吸。与 NF 和 CK 相比,CF 枯枝落叶层呼吸占土壤异养呼吸比例较低,这与其枯枝落叶层现存量较低有关^[5]。

单位土壤有机 C 的 CO₂ 释放量可以作为不同森林类型土壤有机 C 稳定性的指标^[31]。矿质土壤单位有机 C 的 CO₂ 释放量以 NF 最高,其次为 CK,而 CF 的则最低(表 6),表明 NF 矿质土壤有机 C 最不稳定,而 CF 矿质土壤有机 C 最为稳定,这与 NF、CK、CF 土壤非保护性有机 C 含量及其占有有机 C 的比例依次降低有关^[6]。与 2002 年相比,2003 年 NF、CK、CF 单位土壤有机 C 的 CO₂ 释放量分别下降了 10.7%、16.4%和 17.2%,表明人工林(CK 和 CF)的土壤有机 C 对干旱的敏感性(响应程度)比天然林的更大。这对我国南方大面积人工林经营将有较大的指导价值。

表 6 不同森林类型 0~100 cm 矿质土壤单位有机 C 的 CO₂ 释放量

Table 6 CO₂ efflux of unit gram of SOC in mineral soils under different forests (C g g⁻¹)

年份 Year	NF	CK	CF
2002	0.036 4	0.030 4	0.016 3
2003	0.032 5	0.025 4	0.013 5
平均 Mean	0.034 4	0.027 9	0.014 9

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] 杨玉盛. 杉木林可持续经营的研究. 北京: 中国林业出版社, 1998. Yang Y S, ed. Studies on Sustainable Management of Chinese Fir Plantations (In Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1998
- [3] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, et al. Litterfall, nutrient return, and leaf-litter decomposition in four plantations compared with a natural forest in subtropical China. Annals of Forest Science, 2004, 61:465~476
- [4] Yang Y S, Chen G S, Guo J F, et al. Fine root distribution, seasonal pattern and production in native and monoculture plantation forests in Subtropical China. Annals of Forest Science, 2004, 61: 617~627
- [5] 杨玉盛,郭剑芬,林鹏,等. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库. 生态学报, 2004, 24(2): 359~367. Yang Y S, Guo J F, Lin P, et al. Carbon and nutrient pools of forest floor in native forest and monoculture plantations in subtropical China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(2): 359~367
- [6] 杨玉盛,刘艳丽,陈光水,等. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机 C 研究. 生态学报, 2004, 24(1): 1~8. Yang Y S, Liu Y L, Chen G S, et al. Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 1~8
- [7] 杨玉盛,陈光水,董彬,等. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. 生态学报, 2004, 24(5): 953~958. Yang Y S, Chen G S, Dong B, et al. Response of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 953~958
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical and Chemical Analyses (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technique Press, 1978
- [11] O'Neill K P, Kasidshke E S, Richter D D. Environmental controls on soil CO₂ flux following fire in black spruce, white spruce, and aspen stands of interior Alaska. Can. J. For. Res., 2002, 32(9): 1525~1541
- [12] Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂

- efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, 32: 35~ 45
- [13] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains. *Plant Soil*, 2001, 237(1): 15~ 23
- [14] 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
- [15] 黄承才, 葛滢, 常杰, 等. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究. *生态学报*, 1999, 19(3): 324~ 328. Huang C C, Ge Y, Chang J, *et al.* Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3): 324~ 328
- [16] 冉景丞, 何师意, 曹建华, 等. 亚热带喀斯特森林土壤 CO₂ 排放量动态研究. *贵州科学*, 2002, 20(2): 42~ 47. Ran J C, He S Y, Cao J H, *et al.* A preliminary research on CO₂ release in subtropical karst forest soil (In Chinese). *Guizhou Science*, 2002, 20(2): 42~ 47
- [17] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究. *生态学报*, 2003, 23(8): 1 673~ 1 678. Yi Z G, Yi W M, Zhou G Y, *et al.* Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1 673~ 1 678
- [18] Rout S K, Gupta S R. Soil respiration in relation to abiotic factors, forest floor litter, root biomass and litter quality in forest ecosystems of Sivaliks in northern India. *Acta Oecol. / Oecol. Plant*, 1989, 10: 229~ 244
- [19] Kutesch W L, Kappen L. Aspects of carbon and nitrogen cycling in soils of Bornhoved Lake district. II. Modelling the influence of temperature increase on soil respiration and organic carbon content in arable soils under different managements. *Biogeochemistry*, 1997, 39: 207~ 224
- [20] Gullledge J, Schimel J P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of Taiga Forest stands in Interior Alaska. *Ecosystems*, 2000, 3: 269~ 281
- [21] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217~ 227
- [22] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳库和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518~ 522. Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types (In Chinese). *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000, 24(5): 518~ 522
- [23] 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
- [24] Behera N, Joshi S K, Pati D P. Root contribution to total soil metabolism in a tropical forest soil from Orissa, India. *For. Ecol. Manag.*, 1990, 6: 125~ 134
- [25] Epron D, Farque L, Lucot E, *et al.* Soil CO₂ efflux in a beech forest: The contribution of root respiration. *Ann. For. Sci.*, 1999, 56(4): 289~ 295
- [26] Kelling D L, Burger J A, Edwards G S. Estimating root respiration microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 1998, 30(7): 961~ 968
- [27] 吴仲民, 李意德, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林 C 素库及皆伐影响的初步研究. *应用生态学报*, 1998, 9(4): 341~ 344. Wu Z M, Li Y D, Zeng Q B, *et al.* Carbon pool of tropical mountain rain forests in Jianfengling and effect of clear-cutting on it (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(4): 341~ 344
- [28] 骆士寿, 陈步峰, 李意德, 等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究. *生态学报*, 2001, 21(12): 2 013~ 2 017. Luo S S, Chen B F, Li Y D, *et al.* Litter and soil respiration in a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2 013~ 2 017
- [29] 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. *土壤学报*, 2005, 42(4): 584~ 590. Yang Y S, Chen G S, Wang X G, *et al.* Effect of clear-cutting on soil respiration of Chinese fir plantation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 584~ 590
- [30] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬. 大气 CO₂ 浓度升高对植物-土壤系统地下过程影响的研究. *土壤*, 2003, 35(6): 465~ 472. Ma H L, Zhu J G, Xie Z B. Effect of elevated atmospheric CO₂ on below-ground (In Chinese). *Soils*, 2003, 35(6): 465~ 472
- [31] Fang C M, Smith P, Moncrieff J B, *et al.* Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature*, 2005, 433(6): 57~ 59

SOIL HETEROTROPHIC RESPIRATION IN NATIVE *CASTANOPSIS KAWAKAMII* FOREST AND MONOCULTURE *CASTANOPSIS KAWAKAMII* PLANTATIONS IN SUBTROPICAL CHINA

Yang Yusheng¹ Chen Guangshui¹ Xie Jinsheng² Wang Xiaoguo²

Niu Zhipeng² Han Yonggang² Zhang Youli²

(1 Key Laboratory of Subtropical Resources and Environments of Fujian Province, College of Geography Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

(2 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract Soil heterotrophic respiration (HR) was investigated in one tract of native *Castanopsis kawakamii* forest (NF), a 33-year-old *Castanopsis kawakamii* plantation (CK) and a *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir, CF) plantation of the same age in Sanming, Fujian Province, China. Soil CO₂ efflux was measured in situ in a 2-year period with the alkali sorption technique. Respirations of root-free soils (R_{RF}) and litter layer (R_L) were measured separately by trenching and removing litter, respectively. Both R_{RF} and R_L in the three forests showed a similar seasonal pattern with one single peak occurring during May or June and a valley during December or January. R_L averaged CO₂ 79188, 44137 and 21102 mg m⁻² h⁻¹, and R_{RF} averaged CO₂ 21714, 85185 and 94104 mg m⁻² h⁻¹ in NF, CK and CF, respectively. The model $R = ae^{bT}W^c$ (R stands for soil CO₂ efflux, T for soil temperature and W for soil water content at 0~10 cm soil depth, and a, b, c for the constants) indicated that soil temperature and soil water content together could explain 82%~85% and 85%~92% of R_L and R_{RF}, respectively, with soil temperature being the dominating factor affecting soil respiration rate in 2002 and soil humidity in a dry year of 2003. R_L was more sensitive to variation in soil temperature and humidity than R_{RF}. Annual R_L averaged C 3176, 2163 and 1123 t hm⁻² a⁻¹, and annual R_{RF} averaged C 3144, 2179 and 1149 t hm⁻² a⁻¹, respectively, in the NF, CK, and CF. Differences in soil heterotrophic respiration between forests were associated with differences in quantity and quality of organic inputs, biomass and activity of roots, and content and components of soil organic carbon. R_L in CF showed higher sensitivity to drought than in CK and NF, and the sensitivity of soil organic C to drought was higher in the plantations (CK and CF) than in the native forest (NF).

Key words Native forest; Plantation forest; Soil heterotrophic respiration; Soil temperature; Soil humidity