

中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响

杨玉盛¹, 陈光水¹, 王小国², 谢锦升², 高 人¹, 李 震², 金 钊²

(1. 福建师范大学亚热带资源与环境省重点实验室, 福建师范大学地理科学学院, 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国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呼吸进行为期 2a 的定位研究, 结果表明, 3 种森林土壤呼吸速率季节变化均呈单峰曲线, 最大值出现在 5 月至 6 月份, 最小值出现在 12 月至翌年 1 月份。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林土壤呼吸速率一年中变化范围分别在 403.47~1001.12 mg CO₂ m⁻²h⁻¹、193.89~697.86 mg CO₂ m⁻²h⁻¹ 和 75.97~368.98 mg CO₂ m⁻²h⁻¹ 之间。2002 年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 ($R = ae^{bTW^c}$) 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不同森林土壤呼吸速率季节变化的 80%~96%。杉木林土壤呼吸对气候变化敏感性高于格氏栲天然林和人工林。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林土壤呼吸年通量分别为 13.742、9.439 和 4.543 tC · hm⁻² · a⁻¹, 前者分别约是后二者的 1.5 倍和 3.0 倍。森林转换对土壤呼吸通量的影响可能与枯落物数量和质量、根系呼吸、土壤有机质数量和质量的变化有关。

关键词: 森林转换; 天然林; 人工林; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤湿度

文章编号: 1000-0933(2005)07-1684-07 **中图分类号:** S718.55 **文献标识码:** A

Response of soil CO₂ efflux to forest conversion in subtropical zone of China

YANG Yu-Sheng¹, CHEN Guang-Shui¹, WANG Xiao-Guo², XIE Jin-Sheng², GAO Ren¹, LI Zhen², JIN Zhao² (1. Fujian Key Lab. of Subtropical Resources and Environments, College of Geography Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1684~1690.

Abstract: In many areas of South China, native broad-leaved forests have been cleared for the last several decades, and subsequent development has involved the plantation of more productive forest species. Currently, there is little known about the effects of forest conversion to tree plantations on C sequestration in the subtropical China. Soil respiration in forest ecosystems is one of the major pathways of C flux in the global C cycle, second only to the gross primary productivity, and is markedly affected by forest managements. The present study, as a part of the programme examining what changes in ecosystem carbon dynamics during conversing native forest into tree plantations, investigated changes in soil CO₂ efflux between a native forest of *Castanopsis kawakamii* (NF) and two plantations of *Castanopsis kawakamii* (CK) and *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir, CF) in sanming, Fujian. Mean annual rainfall was 1605.9mm in this area. Total rainfall was 1864.6mm in year 2002, however, year 2003 was characterized by an extremely low total rainfall of 1002.3mm. Soil respiration was measured in situ 5 to 7 times at end of month during 2002~2003 by the alkali sorption technique, and soil temperature and water content at 10 cm depth were determined at each measurement occasion.

Over the studies period, soil respiration rate varied from 403.47 to 1001.12 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ in the NF, from 193.89 to

基金项目: 高校优秀青年教师奖资助项目; 福建省重大基础研究资助项目(2000F004); 教育部重点科研资助项目

收稿日期: 2004-09-18; **修订日期:** 2005-04-10

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

Foundation item: The Teaching and Research Award Program for MOE P. R. C. (TRAPOYT), the Key Basic Research Project of Fujian Province (No. 2000F004) and the Key Research Project of MOE P. R. C.

Received date: 2004-09-18; **Accepted date:** 2005-04-10

Biography: YANG Yu-Sheng, Ph. D., Professor, mainly engaged in C and N cycling of subtropical broad-leaved forests. E-mail: geoyys@fjnu.edu.cn

697.86 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ in the CK, and from 75.97 to 368.98 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ in the CF. It showed a similar seasonal pattern among three forests, with the single peak occurred during late spring or early summer and a minimum during dormant period. Neither soil temperature nor soil water content could explain the seasonal variation of soil respiration well, however, the model $R = ae^{bT}W^c$ (R soil respiration rate, T soil temperature, W soil water content, and a , b , c the constants) indicated that soil temperature and soil water content together could explain 80%~96% of seasonal variation in soil respiration rates. Further, soil water content would become an extreme limiting factor for soil respiration in dry year (2003). Soil respiration rate in the CF had the highest soil temperature and humidity sensitivity, followed by the CK and the NF. Annual soil CO₂ effluxes ranged from 13.742 tC · hm⁻² · a⁻¹ in the NF to 9.439 tC · hm⁻² · a⁻¹ in the CK and to 4.543 tC · hm⁻² · a⁻¹ in the CF. The decline in soil respiration resulted mainly from the many changes associated with forest conversion, including the quantity and quality of organic inputs, root biomass and activity, and the content and component of soil organic carbon.

Key words: forest conversion; native forest; plantation forest; soil respiration; soil temperature; soil moisture; subtropical zone of China

森林生态系统是陆地生态系统的主体,其维持的碳库占全球总C库的46.3%,其中森林植被部分C库占全球植被C库的77.1%^[1]。由人类活动引起的森林转换使生态系统C贮量下降的同时不断向大气释放CO₂,据报道近150a来全球因土地利用变化而向大气排放的CO₂量的87%源于森林转换^[1]。因此,森林转换对生态系统C吸存的影响在全球C循环中具有十分重要的地位。作为森林生态系统主要CO₂源的土壤呼吸(约68±4 Pg C a⁻¹),它的微小变化不但会引起大气中CO₂浓度的明显改变,更会影响森林贮存C能力^[1]。在目前已建立的长期监测CO₂通量网站中,森林土壤呼吸已成为重要的监测项目之一^[1~4]。国外对影响温带森林土壤呼吸因素(温度、湿度、土壤肥力条件等)、营林措施(采伐、施肥、灌溉等)及大气CO₂浓度升高、全球升温、酸沉降等对土壤呼吸影响报道较多^[4],但对热带特别是亚热带相关研究很少,而我国对森林土壤呼吸研究则与国外有相当差距,目前相关报道不多^[4]。

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150a以上)和面积(700hm²)较大、保存较为完整的中国亚热带天然常绿阔叶林。20世纪60年代,部分的格氏栲天然林曾被皆伐、炼山、整地等后营造诸如杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、格氏栲*Castanopsis kawakamii*等结构单一的人工纯林,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,从而为森林转换对生态系统C吸存影响等提供良好的试验地条件。本课题组前期已对格氏栲天然林和人工林凋落物数量及养分归还和释放、细根净生产力及周转、枯枝落叶层碳库、土壤非保护性有机C、土壤呼吸对干湿交替的响应以及土壤生物学活性等进行报道^[5~10]。本文着重探讨森林转换对土壤呼吸动态的影响,为科学评价天然林转换为人工林对生态系统C贮存的影响机理及合理的森林C吸存经营措施体系的采取提供基础数据。

1 试验地概况

试验地位于福建省三明市莘口镇,试验地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、土壤性质请参见文献^[5,6]。试验地多年(1961~1990年)平均降水量为1605.9mm,平均气温为19.4℃;试验地2002年、2003年的降水量分别为1864.6mm和1002.3mm,年均气温分别为20.9℃和21.2℃。试验地2002年、2003年及多年(1961~1990)平均月降水量和月均气温见图1。

2 研究方法

2.1 土壤呼吸测定方法

采用密闭室碱吸收法测定格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林中土壤呼吸。密闭室用马口铁皮(外涂白漆)自制,直径20cm,高30cm,下端开口。测定时,将内盛有20ml 1mol/L的NaOH(视呼吸作用强度调整NaOH浓度)的玻璃瓶(未封口,开口直径为6cm)放在离地面约2cm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5cm,并盖土压实以防止漏气。放置24h后,取出玻璃瓶,迅速密封后带回实验室,用标准盐酸溶液滴定,每个林分重复15次。从2002年1月始至2003年12月,在每月下旬每天观测土壤呼吸,每月连续观测5~7d。每次同时测定每个观测点附近地表(5cm)处地温和地表(0~10cm)处土壤含水量。

2.2 土壤呼吸模型构建

通过收集国内外有关土壤呼吸(R)与土壤温度(T)和土壤湿度(W)的关系模型对试验数据进行拟合发现,本研究所构建的土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度的双因素模型($R = ae^{bT}W^c$)拟合效果均优于已报道的模型。为了分析土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸的共同影响和单独影响,本研究采取如下模型进行比较:

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

$$R = ae^{bT}$$

$$R = aW + b$$

式中, a, b 和 c 为待定参数。

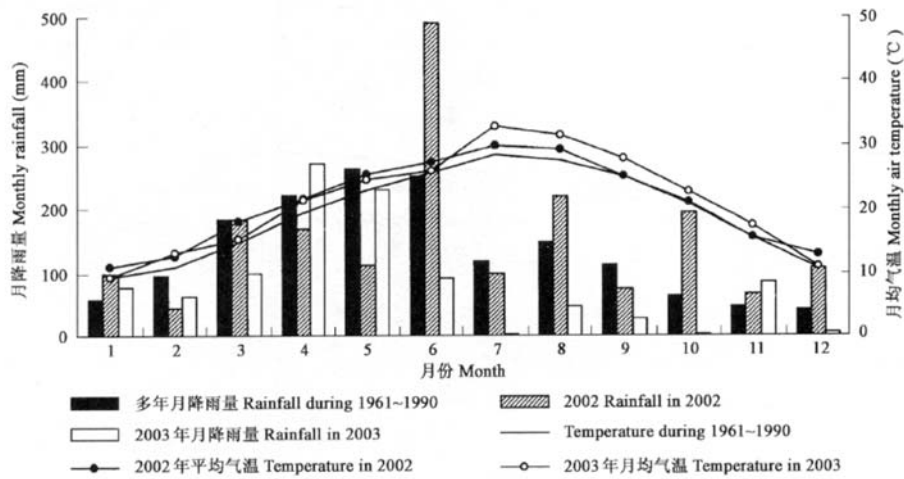


图1 试验地 2002 年、2003 年及 30a(1961~1990 年)平均月降水量和月均气温
Fig. 1 Monthly rainfall and air temperature in 2002 and 2003 and during 1961~1990

2.3 土壤呼吸年通量计算

以每月连续测定的土壤呼吸速率平均值代表该月平均土壤呼吸速率,通过累加计算求得当年土壤呼吸年通量。

3 结果与分析

3.1 不同森林土壤呼吸季节动态

不同森林土壤呼吸速率季节变化规律基本一致,均呈单峰曲线,最大值出现在春末或夏初(5月至6月份之间),最小值出现在12月至翌年1月份间(图2~图4)。格氏栲天然林年平均土壤呼吸速率($587.90\text{ mg CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$)分别是格氏栲和杉木人工林(390.20 和 $184.49\text{ mg CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$)的1.5倍和3.2倍;土壤呼吸速率最大值($1001.12\text{ mg CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$)分别是格氏栲和杉木人工林(697.86 和 $368.98\text{ mg CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$)的1.4倍2.7倍,最小值($403.47\text{ mg CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$)则分别是格氏栲和杉木人工林(193.89 和 $75.97\text{ mg CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$)的2.1倍和5.3倍。土壤呼吸速率变化幅度(最大值与最小值之差除以平均值)则以杉木人工林的(159%)最大,格氏栲人工林的(129%)次之,而以格氏栲天然林的(102%)最小。

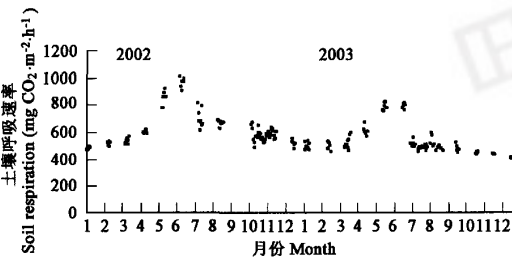


图2 格氏栲天然林土壤呼吸季节动态
Fig. 2 Season dynamic of soil respiration in the NF

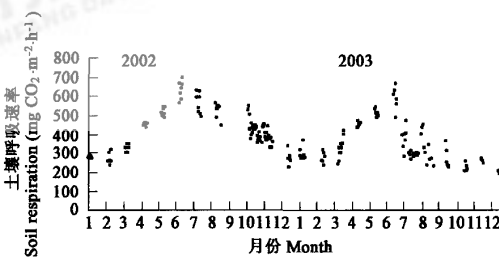


图3 格氏栲人工林土壤呼吸季节动态
Fig. 3 Season dynamic of soil respiration in the CK

3.2 土壤呼吸速率与土壤温度和湿度关系

若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 2002~2003 年土壤呼吸速率季节变化的 80%~96%(表1);若仅考虑单因素模型($R=ae^{bT}$ 或 $R=aW+b$)时,土壤温度和土壤湿度仅分别解释了不同森林 2002~2003 年土壤呼吸变化的 7%~80%和 40%~70%(表1),表明亚热带森林土壤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)。

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)大小顺序均为杉木人工林>格氏栲人工林>格氏栲天然林,表明杉木人工林土壤呼吸对温度和湿度变化更为敏感(表 1),从而导致杉木林土壤呼吸的年变化幅度远高于格氏栲天然林和人工林的(图 2~图 4),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。

格氏栲天然林和人工林 2002 年和 2003 年土壤呼吸对土壤湿度的敏感性较为接近,但杉木人工林 2003 年土壤呼吸对土壤湿度的敏感性则远高于 2002 年的(表 1),表明降水量减少或气温升高对杉木林(针叶林)土壤呼吸的影响远大于阔叶林的,这亦预示着在中国亚热带针叶林土壤呼吸对未来全球气候变化的响应比阔叶林更为敏感。

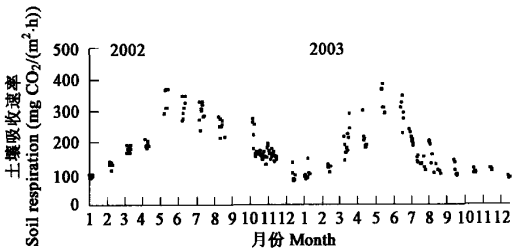


图 4 杉木人工林土壤呼吸季节动态 .
Fig. 4 Season dynamic of soil respiration in the CF

表 1 土壤呼吸速率(R)与土壤温度(T)和湿度(W)不同关系模型参数
Table 1 Parameters of different soil respiration models

森林类型 Forest type	年份 Year	$R=ae^{bT}$			$R=aW+b$			$R=ae^{bT}W^c$			
		a	b	r^2	a	b	r^2	a	b	c	r^2
NF	2002	378.135	0.0288	0.533**	13.598	178.086	0.490**	43.703	0.0277	0.625	0.863**
	2003	449.016	0.0086	0.074	11.430	268.470	0.704**	79.040	0.0133	0.528	0.795**
CK	2002	192.975	0.0448	0.749**	13.733	1.488	0.404**	18.716	0.0402	0.705	0.959**
	2003	182.319	0.0352	0.384*	11.352	90.372	0.637**	25.535	0.0303	0.669	0.878**
CF	2002	60.469	0.0651	0.799**	10.088	-83.455	0.397*	2.843	0.0557	0.967	0.926**
	2003	80.761	0.0334	0.198*	8.698	-22.601	0.688**	1.717	0.0444	1.917	0.935**

* 相关关系显著($p<0.05$), ** 相关关系极显著($p<0.01$) *Correlation is significant at $p<0.05$ and ** at $p<0.01$

3.3 土壤呼吸年通量

格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林年均土壤呼吸通量分别为 13.742、9.439 和 4.543 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,前者分别约是后二者的 1.5 倍和 3.0 倍;不同森林 2003 年土壤呼吸通量分别比 2002 年的减少 17.0%、19.4%和 21.6%(分别降低 2.555、2.024、1.100 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)(表 2)。

4 讨论

4.1 土壤呼吸对土壤温度和湿度的响应

土壤温度和湿度是影响森林土壤呼吸的主要因素,由于土壤温度和土壤湿度不同配置导致了土壤呼吸的季节波动^[4]。目前揭示土壤呼吸与土壤温度或土壤湿度的单因素关系模型报道较多,而双因素关系模型不多^[11,12],而国内尚未见报道。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 2002~2003 年土壤呼吸变化的 80%~96%(表 1),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^[13~15]。双因素模型明显优于仅考虑土壤温度或土壤湿度的单因素模型,特别在亚热带 7~9 月份气温高,降水量少(图 1),此阶段土壤含水量一般处在一年中较低水平,使用单因素模型推算土壤呼吸年通量,结果的可靠性将较难得到保证。

本研究 2002 和 2003 年土壤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(1864.6mm)和年均气温(20.9℃)与该地 30a 平均降水量(1605.9mm)和平均气温(19.4℃)相近,该年度不同森林土壤呼吸与土壤温度的相关性均高于土壤湿度的(表 1),表明该地森林土壤呼吸速率主要受土壤温度的影响(仅土壤温度可单独解释 53%~80%),这与亚热带其他研究者报道结果相似^[16~18]。而 2003 年降水量(1002.3mm)远低于该地 30a 平均降水量,且年均气温(21.2℃)高于 30a 平均气温,是该地极端干旱年份。该年度土壤呼吸速率明显受土壤湿度影响,仅土壤湿度即可解释土壤呼吸速率变化的 64%~70%(表 1)。其中,2003 年的 6~10 月份总降雨量仅为 170.8mm,与多年平均和 2002 年同期降雨量(分别为 693.8mm 和 1080.3mm)相比分别降低了 75%和 84%。不同森林 2003 年 6~10 月份与 2002 年相比,该时段的平均土壤温度升高 1.7~2.8℃,平均土壤湿度下降了 10.8%~14.5%(表 3)。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林 2003 年 6~10 月土壤呼吸总量分别比 2002 年同期土壤呼吸总量降低了 25%、55%和 39%(表 3)。与 2002 年相比,格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林 2003 年该时段土壤呼吸的降低值分别占 2003 年全年土壤呼吸降低值的 71%、83%和 111%(表 2,表

表 2 不同森林土壤呼吸年通量($\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 2 Annual C efflux from soil respiration in the NF, CK and CF

森林 Forest	2002	2003	平均 Mean
NF	15.019	12.464	13.742
CK	10.451	8.427	9.439
CF	5.093	3.993	4.543

3),表明 2003 年土壤呼吸通量的下降主要发生在该持续干旱时段内。

持续干旱亦对土壤温度、土壤湿度与土壤呼吸的关系产生影响。从表 4 可见,与 2002 年的相比,2003 年 6~10 月土壤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,接近于甚至超过土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度双因素模型的相关性,表明持续干旱期间土壤呼吸主要受土壤湿度调控。这与 Rout 和 Gupta 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 月不同森林双因素模型的相关系数均有所降低。格氏栲天然林和人工林参数 b 的降低幅度远高于杉木人工林的,格氏栲天然林参数 b 甚至出现负值(即随温度升高土壤呼吸下降)(表 4)。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^[20~22]。

表 3 2002 年和 2003 年 6~10 月土壤呼吸与 5cm 处平均土壤温度、土壤湿度

Table 3 Soil respiration, mean soil temperature and soil water content at 5 cm depth during June to October in 2002 and 2003						
	2002			2003		
	土壤温度 Soil temperature (°C)	土壤湿度 Soil water content (%)	土壤呼吸 Soil respiration (tC · hm ⁻²)	土壤温度 Soil temperature (°C)	土壤湿度 Soil water content (%)	土壤呼吸 Soil respiration (tC · hm ⁻²)
NF	21.1	34.8	7.219	23.9	20.3	5.395
CK	21.5	32.5	3.548	23.8	19.0	2.447
CF	21.9	29.1	2.725	23.6	18.3	1.502

表 4 2002 年和 2003 年 6~10 月土壤呼吸速率(R)与土壤温度(T)和湿度(W)不同关系模型参数

Table 4 Parameters of different soil respiration models during June to October in 2002 and 2003							
森林类型 Forest type	年份 Year	$R=ae^{bT}$	$R=aW+b$	$R=ae^{bTW^c}$			r^2
		r^2	r^2	a	b	c	
NF	2002	0.394 *	0.340 *	18.781	0.0354	0.810	0.939 **
	2003	0.002	0.813 **	143.490	-0.0171	0.568	0.802 **
CK	2002	0.449 **	0.294 *	12.668	0.0350	0.743	0.906 **
	2003	0.060	0.791 **	20.467	0.0047	0.793	0.787 **
CF	2002	0.733 **	0.113 *	2.611	0.0648	0.939	0.883 **
	2003	0.207 *	0.567 **	9.749	0.0405	0.616	0.636 **

* 相关关系显著 ($p<0.05$), ** 相关关系极显著 ($p<0.01$) *Correlation is significant at $p<0.05$ and ** at $p<0.01$

4.2 森林转换对土壤呼吸年通量的影响

虽然本研究 2002 年(丰雨年)和 2003 年(少雨年)测定的土壤呼吸年通量的平均值仍不足于代表该地的常年均值,但仍可与世界其它地区森林的土壤呼吸通量作相对比较。本研究中不同森林土壤呼吸年通量均落入热带、亚热带森林土壤呼吸年通量范围之内(3.45~15.20 tC · hm⁻² · a⁻¹)^[23]。本研究格氏栲天然林土壤呼吸年通量(13.742 tC · hm⁻² · a⁻¹)均高于尖峰岭热带山地雨林(9.0 tC · hm⁻² · a⁻¹)^[24]、鼎湖山季风常绿阔叶林(11.5 tC · hm⁻² · a⁻¹)和针阔混交林(10.4 tC · hm⁻² · a⁻¹)^[18]、茂兰喀斯特森林(5.3 tC · hm⁻² · a⁻¹)^[17]和青冈常绿阔叶林(6.6 tC · hm⁻² · a⁻¹)^[16];这种差异除了与气候状况、植被组成、生产力和立地条件等有关外,还可能与土壤呼吸年通量的推算模型差异有关^[16~18,24]。本研究杉木人工林土壤呼吸年通量则小于会同 10 年生杉木人工林(5.9 tC · hm⁻² · a⁻¹)^[25]和千烟洲 14 年生杉木人工林的(9.3 tC · hm⁻² · a⁻¹)^[26],表明处于成熟或近熟阶段(33 年生)的杉木林土壤呼吸小于速生阶段。

本研究天然林土壤呼吸年通量高于人工林的,这与鼎湖山季风常绿阔叶林土壤呼吸高于马尾松林的结果相似^[18]。本研究阔叶林土壤呼吸年通量均高于杉木人工林的,这与阔叶林土壤呼吸速率比松树林的高^[27,28]的结果相似。Raich 等通过分析土壤呼吸速率变化的全球模式指出针叶林土壤呼吸速率一般比相同土壤上的阔叶林的低约 10%左右^[29]。

Raich 等指出,在全球尺度上,同时影响有机物的生产和消耗的因素如温度、湿度及基质性质是调控土壤呼吸速率的最主要因素^[29]。相同立地条件下(气候状况和土壤本底相同),森林植被对土壤呼吸有重要的影响,它可通过影响枯落物数量和质量、根呼吸速率、土壤状况及小气候条件等而影响土壤呼吸^[29]。与人工林相比,格氏栲天然林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)^[5~7],从而有利于土壤微生物数量的提高^[10],促进了土壤微生物呼吸(格氏栲天然林土壤异养呼吸是杉木人工林的 2.5 倍)。另外,格氏栲天然林改为格氏栲和杉木人工林后,细根生物量分别下降了 35.3%和 70.0%^[5],其根系呼吸亦分别下降了 52.4%和 76.7%,从而使土壤呼吸通量显著下降。由于森林对 C 吸存的贡献大小取决于生态系统 C 源和 C 汇平衡的结果,因而,虽然格氏栲天然林土壤呼吸年通量比人工林的高,但其是否不利于大气 CO₂ 吸存,这还有待于对天然林和人工林生态系统的 C 平衡分析。

References:

- [1] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, **263**: 185~190.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 7~20.
- [3] Baldocchi D, Falge E. *A report from the Polson FLUXNET workshop*. FLUXNET workshop, Polson Montana, 1998.
- [4] Yang Y S, Dong B, Xie J S, *et al.* Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(3): 583~591.
- [5] Yang Y S, Chen G S, Lin P, *et al.* Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(9): 1719~1730.
- [6] Yang Y S, Lin P, Guo J F, *et al.* Litter Production, nutrient return and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(7): 1278~1289.
- [7] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(2): 359~367.
- [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. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(1): 1~8.
- [9] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(5): 953~958.
- [10] 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.
- [11] Schlentner R E and Van Cleve K. Relationships between CO₂ evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. *Can. J. For. Res.*, 1985, **15**: 97~106.
- [12] Carlyle J C and Than U BA. Abiotic controls of soil respiration beneath an eighteen-year-old *Pinus radiata* stand in south-eastern Australia. *Journal of Ecology*, 1988, **76**: 654~662.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(3): 324~328.
- [17] Ran J C, He S Y, Cao J H, *et al.* A preliminary research on CO₂ release in subtropical karst forest soil. *Guizhou Science*, 2002, **20**(2): 42~47.
- [18] Yi Z G, Yi W M, Zhou G Y, *et al.* Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(8): 1673~1678.
- [19] 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 Siwaliks in northern India. *Acta Oecol.*, 1989, **10**: 229~244.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochem. Cycles*, 1995, **9**: 23~36.
- [24] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(12): 2013~2017.
- [25] Fang X, Tian D L. CO₂ emission from Chinese fir plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, **33**(sp. 2): 94~103.
- [26] Zhou Z T, Cheng S K, Liu Y F, *et al.* CO₂ emission of soil under different land use types in subtropical red soil hilly areas in China:

- preliminary exploration. *Resources Science*, 2002, **24**(2): 83~87.
- [27] Hudgens E, Yavitt J B. Land-use effects on soil methane and carbon dioxide fluxes in forests near Ithaca, New York. *Ecoscience*, 1997, **4**: 214~222.
- [28] Liu S H, Fang J Y, Kiyota M. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, **22**(2): 119~126.
- [29] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 71~90.

参考文献:

- [4] 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.
- [5] 杨玉盛,陈光水,林鹏,等. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力. 生态学报,2003, **23**(9): 1719~1730.
- [6] 杨玉盛,林鹏,郭剑芬,等. 格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解(英). 生态学报, 2003, **23**(7): 1278~1289.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [16] 黄承才,葛滢,常杰,等. 中国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.
- [17] 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.
- [18] 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): 1673~1678.
- [24] 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): 2013~2017.
- [25] 方晰,田大伦. 杉木人工林林地 CO₂ 释放量的研究. 林业科学,1997, **33**(sp. 2): 94~103.
- [26] 周志田,成升魁,刘允芬,等. 中国亚热带红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤 CO₂ 排放规律初探. 资源科学,2002, **24**(2): 83~87.
- [28] 刘绍辉,方精云,清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸. 植物生态学报,1998, **22**(2): 119~126.