

格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态及影响因素

陈光水¹, 杨玉盛^{1*}, 王小国², 谢锦升², 高 人¹, 李 震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:通过用挖壕沟+静态碱吸收法对福建三明格氏栲天然林及 33 年生格氏栲和杉木人工林的根系呼吸进行为期 2a 定位研究。不同森林根系呼吸速率季节变化均呈单峰曲线, 最大值出现在春末或夏初, 最小值出现在冬季。1 年中格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林根系呼吸速率变化范围分别在 157.76~480.40 mg CO₂/(m²·h)、53.03~339.45 mg CO₂/(m²·h) 和 16.66~228.02 mg CO₂/(m²·h) 之间。在近似正常气候状况的 2002 年, 不同森林根系呼吸主要受土壤温度影响($R^2=0.52\sim0.72$); 而土壤温度和土壤湿度共同则可解释根系呼吸速率季节变化的 81%~90%。在极端干旱的 2003 年, 根系呼吸受土壤温度或湿度的影响较小, 土壤温度和土壤湿度共同仅能解释根系呼吸变化的 24%~60%, 这与根系在持续干旱期间长期处于近休眠状态有关。根系呼吸对土壤温度和土壤湿度的敏感性大小顺序均为杉木人工林>格氏栲人工林>格氏栲天然林。格氏栲天然林根系呼吸占土壤呼吸比例(47.6%)均高于格氏栲和杉木人工林的(42.5%和 40.2%), 不同森林根系呼吸占土壤呼吸比例均以冬季最低, 而以 5 月或 6 月最高。格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林根系呼吸年通量分别为 6.537、4.013 和 1.828 tC/(m²·h)。

关键词:根系呼吸; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤湿度; 格氏栲; 杉木; 天然林; 人工林

文章编号:1000-0933(2005)08-1941-07 **中图分类号:**S153.61 **文献标识码:**A

Root respiration in a natural forest and two plantations in subtropical China: seasonal dynamics and controlling factors

CHEN Guang-Shui¹, YANG Yu-Sheng^{1*}, WANG Xiao-Guo², XIE Jin-Sheng², GAO Ren¹, LI Zhen²

(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(8): 1941~1947.

Abstract: Tree root respiration is a primary contributor to the soil CO₂ pool, and 2/3 of forest total soil respiration results from root respiration. Information about root respiration is useful for evaluating implications of environmental change on soil carbon cycling, carbon sequestration and developing carbon dynamic model in forest ecosystems. However, not until recent years that the researches on tree root respiration attracts the ecologists. The primary purpose of this study was to determine seasonal dynamics, controlling factors and inter-stand difference of root respiration in a native forest of *Castanopsis kawakamii* (NF) and two plantations of *Castanopsis kawakamii* (CK) and *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir, CF) in sanming, Fujian, during a period of 2002~2003. Root respiration was separated from microbial respiration by trenching, and the rates were determined in situ utilizing the alkali sorption technique. Root respiration rates in the three forests showed a similar seasonal pattern with one single peak occurred during late spring or early summer and a minimum during dormant season, and varied from 157.76 to 480.40 mg CO₂/(m²·h) in the NF, from 53.03 to 339.45 mg CO₂/(m²·h) in the CK, and from 16.66 to 228.02 mg CO₂/(m²·h) in the CF. In year 2002, a year representative of normal climate condition, root respiration was mainly controlled by

基金项目:国家自然科学基金项目(30300272; 30170770); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目

收稿日期:2004-08-09; **修订日期:**2005-03-14

作者简介:陈光水(1976~), 男, 福建仙游人, 硕士, 讲师, 主要从事森林生态学研究。

* **通讯作者** Author for correspondence. E-mail: geoyys@fjnu.edu.cn

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 30300272; 30170770); the Teaching and Research Award program for MOE P. R. C. (TRAPOYT)

Received date:2004-08-09; **Accepted date:**2005-03-14

Biography: CHEN Guang-Shui, Master, mainly engaged in root ecology and carbon management in forest.

soil temperature (at 5 cm depth) ($R^2=0.52\sim0.72$), and soil temperature and soil water content (at 0~10 cm depth) together could explain 81%~90% of variation in root respiration. In year 2003, a year with extremely low rainfall during June to October, soil temperature and soil water content together could explain only 24%~60% of variations in root respiration. The poor correlation of root respiration to soil temperature and soil water content together in year 2003 might be attributed to the acclimation mechanism of roots to the long dry season, during which root respiration remain in very low level similar to that in dormant season. Root respiration rate in the CF had the highest soil temperature and humidity sensitivity, followed by the CK and the NF. Annual CO_2 effluxes from root respiration ranged from 7.296 $\text{tC}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ in the NF to 4.470 $\text{tC}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ in the CK and 2.111 $\text{tC}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ in the CF in year 2002, and varied from 5.779 $\text{tC}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ in the NF to 3.557 $\text{tC}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ in the CK and 1.545 $\text{tC}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ in the CF in year 2003. The contribution of root respiration to soil respiration peaked in May or June and minimized in winter season, and averaged 47.6%, 42.5% and 40.2% respectively in the NF, CK and CF.

Key words: root respiration; soil respiration; soil temperature; soil moisture; *Castanopsis kawakamii*; *Cunninghamia lanceolata*; native forest; plantation forest

林木根系呼吸每年所消耗的呼吸底物占林木总光合作用产物的 50%左右^[1],其本身可占森林土壤呼吸的 10%~90%(主要集中在 40%~60%)^[2],是森林生态系统 C 循环的重要组成部分,有关林木根系呼吸的数据是构建和完善各种尺度森林生态系统碳动态模型所缺乏和必需的^[3]。然而,由于林木根系呼吸包含在土壤呼吸中,分离林木根系呼吸和微生物呼吸存在较大技术困难,长期以来,有关林木根系呼吸研究很少。鉴于林木根系呼吸的重要性,在 1995 年的树木根系生理动态过程国际会议上林木根系呼吸被列为优先研究领域。此后,有关林木根系呼吸的报道有所增加^[4,5]。目前,有关林木根系呼吸通量大小、季节动态、组成及对土壤呼吸贡献、影响因素(如土壤温度、根直径大小、根组织 N 浓度、测定环境 CO_2 浓度、土壤湿度、养分有效性等)、根系呼吸对全球气候变化(大气 CO_2 浓度升高、酸沉降、氮沉降、对流层 O_3 浓度升高等)响应以及根系呼吸与微生物呼吸的分离方法(根系呼吸测定方法)等均有一定报道^[2]。但与森林土壤呼吸相比,国外有关林木根系呼吸研究目前仍较少,且大多集中在温带森林,而对热带和亚热带森林研究极少,我国有关林木根系呼吸的研究则几乎是空白^[2]。

我国中亚热带地区存在的常绿阔叶林是全球同纬度特有的重要森林类型,具有极高的生物量和生产力,对全球陆地生态系统 C 贮存发挥着重要贡献。长期以来,天然林转换为人工林是中亚热带山区普遍的土地利用变化形式,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。这种森林转换对生态系统 C 贮存动态的影响引起了人们的高度关注,但目前尚无相关的研究。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 150a 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,部分的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试验地条件。本课题组前期已对格氏栲天然林和人工林的生态系统凋落物数量及养分归还、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 含量和分配、土壤呼吸对干湿交替的响应、土壤生物学活性等进行研究^[6~9]。本文探讨天然林与人工林、阔叶树与针叶树根系呼吸动态差异,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 2002 年、2003 年及多年平均(1961~1990 年)降水量和气温见图 1,试验地其它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^[10,11]。

2 研究方法

2.1 根系呼吸测定方法

在格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林的各 3 块 20m×20m 标准地中分别设置切断根系(挖壕沟)和保留根系(不挖壕沟)2 种处理(每种处理小区面积为 1m×1m)^[5],每块标准地内各处理按随机布置原则重复 5 个,每种森林各处理共重复 15 个。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(1×1m²)贴在壕沟周围后将土回填,以阻止根系向小区内生长。采用密闭室碱吸收法,从 2002 年 1 月份始至 2003 年 12 月,在每个月下旬观测各小区表面 CO_2 释放速率,连续观测 5~7d。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 溶液(视呼吸作用强度可适当提高 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^[5]。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。

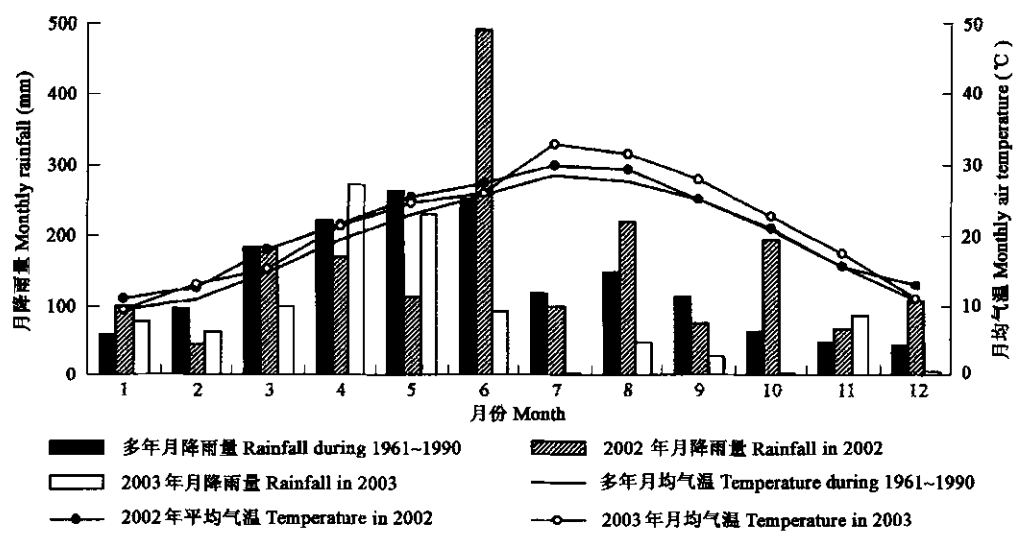


图1 试验地 2002 年、2003 年及 30a(1961~1990 年)平均月降水量和月均气温
Fig.1 Monthly rainfall and air temperature in 2002 and 2003 and during 1961~1990

2.2 根系呼吸计算

根系(含根际,下同)呼吸=保留根系小区表面 CO₂ 释放速率-切断根系小区表面 CO₂ 释放速率

2.3 根系呼吸模型构建

通过收集国内外有关根系呼吸(*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,本研究所构建的根系呼吸与土壤温度和土壤湿度的双因素模型($R=ae^{bTW^c}$)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根系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:

$$R = ae^{bTW^c}$$
$$R = ae^{bT}$$
$$R = cW + d$$

式中,*a*、*b*、*c* 和 *d* 为模型待定参数。

2.4 根系呼吸年通量计算

通过把每月连续测定的根系呼吸速率平均值代表该月平均根系呼吸速率,通过累加计算求得当年根系呼吸年通量。

3 结果与分析

3.1 不同森林根系呼吸季节动态

不同森林根系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月下旬或6月下旬之间),而以冬季为最低(图2,图3,图4)。1年中,格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林根系呼吸速率变化范围分别在157.76~480.40 mg CO₂/(m²·h)、53.03~339.45 mg CO₂/(m²·h)和16.66~228.02 mg CO₂/(m²·h)之间;杉木人工林根系呼吸速率季节变动幅度最大,是平均值的291%;格氏栲人工林的次之,为平均值的170%;而格氏栲人工林的则最小,为平均值的120%。格氏栲天然林年平均根系呼吸速率(269.50 mg CO₂/(m²·h))分别是格氏栲人工林和杉木人工林(168.86 mg CO₂/

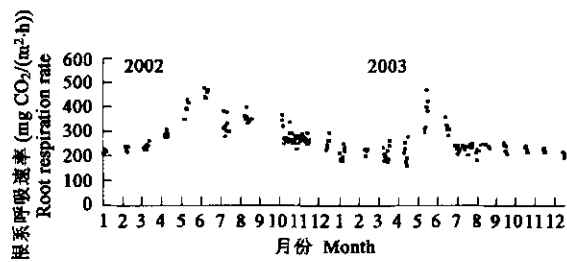


图2 格氏栲天然林根系呼吸季节动态

Fig.2 Season dynamic of root respiration in the NF

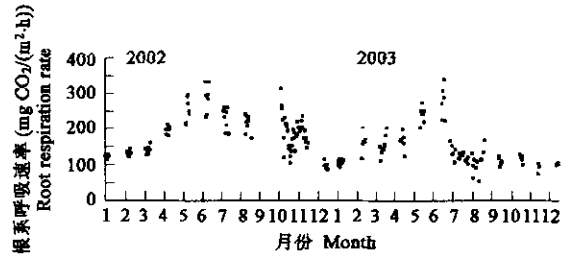


图3 格氏栲人工林根系呼吸季节动态

Fig.3 Season dynamic of root respiration in the CK

($\text{m}^2 \cdot \text{h}$)和 $72.71 \text{ mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)的 1.6 倍和 3.7 倍。

3.2 土壤温度和湿度对根系呼吸的影响

2002 年不同森林根系呼吸与土壤温度的相关性均高于土壤湿度的,而 2003 年根系呼吸与土壤温度的相关性则低于土壤湿度的,且 2003 年根系呼吸与土壤温度或湿度的相关性均低于 2002 年的(表 1)。

采用根系呼吸速率与土壤温度和土壤湿度的双因素关系模型($R = ae^{bTW^c}$)时,不同年份双因素关系模型拟合结果均优于仅考虑土壤温度或湿度的单因素关系模型,表明根系呼吸在某种程度上共同受土壤温度和湿度的控制。但 2002 年土壤温度和土壤湿度共同解释了不同森林根系呼吸速率季节变化的 $81\% \sim 90\%$,而 2003 年则仅为 $24\% \sim 60\%$ (表 1)。

从双因素关系模型($R = ae^{bTW^c}$)的参数可看出,2003 年参数 b (温度敏感性因子)和参数 c (湿度敏感性因子)均远低于 2002 年的。不同年份根系呼吸的湿度敏感性因子(参数 c)大小顺序均为杉木人工林>格氏栲人工林>格氏栲天然林。2002 年杉木人工林根系呼吸的温度敏感性因子(参数 b)高达 0.1,而 2003 年则降低至 0.015;而格氏栲天然林和人工林根系呼吸的温度敏感性因子降低值则相对较小(表 1)。

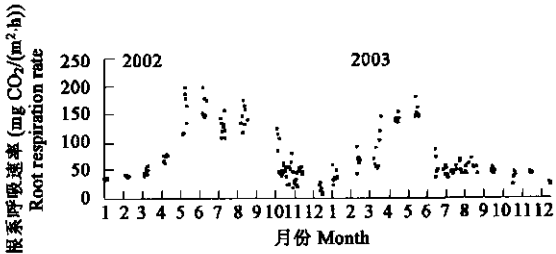


图 4 杉木人工林根系呼吸季节动态

Fig. 4 Season dynamic of root respiration in the CF

表 1 根系呼吸速率(R)与土壤温度(T)和湿度(W)不同关系模型参数

森林类型 Forest type	年份 Year	模型参数 Model parameters									
		$R = ae^{bT}$			$R = aW + b$			$R = ae^{bTW^c}$			
		a	b	r^2	a	b	r^2	a	b	c	r^2
NF	2002	170.147	0.0313	0.523	6.9315	66.9609	0.503	16.4164	0.0301	0.6779	0.8953
	2003	161.019	0.0204	0.099	3.6566	151.344	0.327	53.4812	0.0247	0.3838	0.4703
CK	2002	82.7428	0.0459	0.567	7.4416	-41.7807	0.453	3.1466	0.0362	1.0057	0.8065
	2003	79.7248	0.0314	0.221	4.6612	39.5382	0.420	9.4595	0.0315	0.6981	0.5919
CF	2002	8.5197	0.1148	0.718	6.0794	-95.221	0.283	0.0530	0.1069	1.5665	0.8726
	2003	48.2034	0.0087	0.008*	6.8732	2.7223	0.229	2.7760	0.0154	0.9248	0.2367

* 相关关系不显著($p>0.05$) Correlation is not significant ($p>0.05$)

3.3 不同森林根系呼吸年通量及其对土壤呼吸的贡献

格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林年平均根系呼吸通量分别为 6.537 、 4.013 和 $1.828 \text{ tC}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,前者分别是后二者的 1.6 倍和 3.6 倍;不同林分 2003 年根系呼吸通量分别比 2002 年下降了 20.8%、20.4%和 26.8%(表 2)。格氏栲天然林根系呼吸占土壤呼吸比例最高达 47.6%,而格氏栲和杉木人工林的则较为接近(分别为 42.5%和 40.2%)。不同森林根系呼吸占土壤呼吸比例的季节变化相似,1 年中基本呈现单峰模式,均以冬季最低,而以 5 月或 6 月最高(图 5);但杉木林根系呼吸占土壤呼吸比例的季节变化幅度($12.0\% \sim 60.5\%$)则远大于格氏栲天然林和人工林的(分别为 $41.0\% \sim 61.5\%$ 和 $35.6\% \sim 53.5\%$)(图 5)。

表 2 不同森林根系呼吸(RR)年通量及其对土壤呼吸(SR)的贡献

年份 Year	NF			CK			CF		
	RR	SR	RR/SR	RR	SR	RR/SR	RR	SR	RR/SR
	($\text{t C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)	($\text{t C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)	(%)	($\text{t C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)	($\text{t C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)	(%)	($\text{t C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)	($\text{t C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)	(%)
2002	7.296	15.019	48.6	4.470	10.451	42.8	2.111	5.093	41.4
2003	5.779	12.464	46.4	3.557	8.427	42.2	1.545	3.993	38.7
平均 Mean	6.537	13.742	47.6	4.013	9.439	42.5	1.828	4.543	40.2

4 讨论

4.1 根系呼吸季节动态及影响因素

本研究中根系呼吸速率在春末夏初最高而在冬季最低,这与 Ebert 和 Lenz 报道的苹果(*Malus pumila*)树根系呼吸在 8 月

最高, 2 月最低^[12]; Desrochers 等报道 *Populus tremuloides* 的细根呼吸速率在生长季节约为休眠季节的 2 倍^[4]; Widén 和 Majdi 报道松树-云杉 (*Pinus sylvestris*-*Picea abies*) 混交林中细根呼吸在 7 月上旬达最高峰 ($4.7 \mu\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$) 后下降, 10 月份则显著降低^[13]; Ryan 等报道的寒温带森林根呼吸早春最大, 秋末最小^[15] 等结果基本相似, 但与 Vose 和 Ryan 报道白松 (*Pinus strobes*) 细根呼吸除在秋初较大外 ($1.64 \mu\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{s})$), 一年中细根呼吸几乎保持恒定 ($0.78 \sim 0.99 \mu\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{s})$)^[14] 的结果则有一定差异。不同研究中根系呼吸速率最大值出现的时间不尽相同, 这与各研究试验地土壤温度、土壤湿度配置状况不同和林木生长节律差异等有关。本研究中 5 月份或 6 月份根系呼吸速率最高, 这与该期土壤温度和湿度条件适宜、根系生长代谢活动旺盛有关; 而冬季根系呼吸速率较低, 则与根系活动受低温限制有关。

本研究 2002 和 2003 年根系呼吸速率与土壤温度、土壤湿度相关性差异可能与不同年份气候状况 (降水量和气温) 差异有关。2002 年的降水量 (1864.6 mm) 略高于该地 30a 平均降水量 (1605.9 mm), 年均气温 (20.9°C) 略高于多年平均气温 (19.4°C) (图 1), 因而 2002 年气候状况可近似代表该地的正常状况。该年内根系呼吸与土壤温度的相关性高于土壤湿度的, 仅土壤温度即可单独解释根系呼吸速率变化的 52%~72% (表 1), 表明该地土壤温度对根系呼吸速率的影响比土壤湿度更为重要。2003 年降水量 (1002.3 mm) 远低于多年平均降水量, 年均气温 (21.2°C) 亦明显高于多年平均气温, 特别是在 6~10 月份降水量极少, 气温明显高于多年平均和 2002 年 (图 1)。因而, 2003 年可代表罕见的极端干旱状况。与正常年份不同, 2003 年根系呼吸速率严重受土壤湿度的限制, 因而根系呼吸与土壤湿度的相关性高于土壤温度。

不同年份双因素模型均优于仅考虑土壤温度或湿度的单因素模型, 表明该地根系呼吸受土壤温度和湿度的共同作用。在正常气候条件下 (2002 年), 土壤温度和土壤湿度共同解释了不同森林根系呼吸速率季节变化的 81%~90%, 这与 Burton 和 Pregitzer 报道的土壤温度和土壤水分有效性共同解释了赤松 (*Pinus resinosa* Ait.) 和糖槭人工林内根系呼吸速率变化的 76% 和 71% 的结果相似^[5]。但在极端干旱年份 (2003 年), 土壤温度和湿度则仅共同解释根系呼吸的 24%~60%, 表明该年份根系呼吸受土壤温度和湿度的影响明显降低, 而受林木生理作用等影响则相对增强。在 2003 年 7~10 月长期干旱期间, 林木生长受水分条件严重限制, 分配给根系的光合作用产物减少, 根系活动较弱 (处于休眠状态) 而长期稳定于较低水平 (图 2~4)。这可能是根系呼吸对干旱的某种适应机制。

在 2002 年, 不同森林根系呼吸对土壤温度和土壤湿度的敏感性均以杉木人工林最高而以格氏栲天然林的最低, 表明杉木人工林根系呼吸对降水量和气温变化较敏感, 而阔叶林特别是作为顶极群落的天然常绿阔叶林则相对具有一定的适应性。这种差异可能与不同森林树种组成和特性差异有关。2003 年不同森林根系呼吸对土壤温度和湿度的敏感性均大为降低, 特别是杉木林根系呼吸对温度的敏感性降低尤为明显, 这亦可能与根系呼吸在干旱条件下的适应机制 (处于休眠状态) 有关。

4.2 根系呼吸通量

本研究根系呼吸年通量天然林高于人工林的, 阔叶林的高于针叶林的, 这与不同森林树种组成及根系 (特别是细根) 生物量、物质组成差异有关。与格氏栲天然林和人工林相比, 杉木林的根系生物量较低 (特别是细根生物量); 其次, 杉木林根系平均 N 含量较低导致比根呼吸 (特别是维持呼吸) 较低 (一般根呼吸速率随根组织 N 浓度的升高而增加)^[16~18]; 其次, 杉木林根系净生产力亦较低而导致根系生长呼吸较低, 从而导致杉木林根系呼吸低于阔叶林的, 这与 Burton 等报道裸子植物比被子植物有较低的根呼吸速率的结果一致^[19]。而格氏栲天然林与人工林根系呼吸年通量差异则可能主要与根系生物量和净生产力差异有关。不同森林 2003 年根系呼吸通量均低于 2002 年, 这与 2003 年根系呼吸受极端干旱条件胁迫有关。

一般林木根系呼吸可占土壤呼吸的 10%~90% (主要集中在 40%~60% 内)^[2], 本研究 3 种森林根系呼吸占土壤呼吸比例亦落入此范围内。格氏栲和杉木人工林根系呼吸占土壤呼吸比例均低于格氏栲天然林的, 这可能与人工林和天然林群落组成和生长阶段差异有关。3 种森林根系呼吸占土壤呼吸比例均在 5 月或 6 月最高, 这与 Widén 和 Majdi^[13] 报道松树-云杉 (*Pinus sylvestris*-*Picea abies*) 混交林中 5 月根系呼吸对土壤呼吸贡献最高达 33%~62%, Edwards^[20] 报道火炬松 (*Pinus Taeda*) 5 月根系呼吸占土壤呼吸比例最大 (78%) 的结果相似, 而与 Lin 和 Ehleringer^[21] 报道 1 年生黄杉 (*Pseudotsuga*) 根系呼吸占土壤呼吸比例在 10 月份最高 (30%) 的结果不尽相同。5 月份或 6 月份 3 种森林根系呼吸占土壤呼吸比例最高, 这与该期温度较高、降水量充沛, 根系生物量最大且根系活动最为旺盛有关。杉木林根系呼吸占土壤呼吸比例季节变化幅度远大于格氏栲天然林和人工林的, 这与杉木林根系呼吸速率季节变动幅度较大有关。

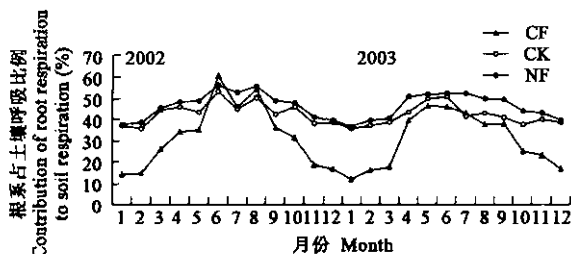


图 5 不同森林根系呼吸占土壤呼吸比例的季节变化

Fig. 5 Monthly changes in contributions of root respiration to soil respiration in NF, CK and CF

4.3 根系呼吸测定方法的影响

林木根系呼吸的精确测定在森林生态系统 C 预算中具有重要作用。由于目前国内外有关根系呼吸研究相对薄弱^[4],精确实用的测定方法则仍在探索之中。目前根系呼吸测定方法有直接和间接测定,直接测定法有离体根法(In vitro root methods)、PVC 管气室法(Cuvette methods)、同位素法(Isotopic methods)等;间接测定有排除根法(Root exclusion methods),包括切除根法(Root removal)、挖壕法(Trenching)、林隙分析(Gap analysis)和环割实验(girdling experiment)等,但各种方法均有各自的优缺点,而挖壕沟法则为根系呼吸测定的传统方法^[2,22]。

由于挖壕沟后林木根系可能仍会存活一段时间及新死根系的分解,新设置的无根小区并未能完全排除根系呼吸,而可能影响测定结果。在预试验中发现,挖壕沟后无根小区的根系呼吸(含分解)基本在 3~4 个月内消失;作者前期研究亦表明,杉木林皆伐后根系呼吸在伐后 3 个月内迅速消失。这与 Edmonds 等^[23]、Fahey 等^[24]和 Ewel 等^[25]的研究结果相似。由于本研究在无根小区设置(挖壕沟法)在测定前 4 个月进行,因而基本可做到排除存活根系呼吸和新死根系分解的影响。另外,由于本研究中对无根小区定期清除地面植被,因而亦基本排除了新长根系的影响。但由于无根小区在排除根系的同时亦排除了根际土呼吸和细根枯落物呼吸,由扣除法(不挖壕沟小区 CO₂ 释放量减去挖壕沟小区 CO₂ 释放量)所得的根系呼吸并非全是根系自养呼吸,而实际上亦包含了根际土呼吸和细根枯落物呼吸而可能使测定的根系呼吸结果偏高。另外,由于挖壕沟对原地干扰较大亦有可能影响测定结果^[22]。

References:

- [1] Lambers H, Stulen I & Werf A. Carbon use in root respiration as affected by elevated atmospheric CO₂. *Plant and Soil*, 1996, **187**: 251~263.
- [2] Yang Y S, Dong B, Xie J S, *et al.* A review of tree root respiration: significance and methodologies. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, **28**(3): 426~434.
- [3] Hogg E H. Simulation of interannual responses of trembling aspen stands to climatic variation and insect defoliation in western Canada. *Ecological Model*, 1999, **114**: 175~193.
- [4] Desrochers A, Landhäusser S M & Lieffers V J. Coarse and fine root respiration in aspen (*Populus tremuloides*). *Tree Physiology*, 2002, **22**: 725~732.
- [5] Burton A J & Pregitzer K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine. *Tree Physiology*, 2003, **23**: 273~280.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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] 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] 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.
- [11] 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.
- [12] Ebert G & Lenz F. Annual course of root respiration of apple trees and its contribution to the CO₂ balance. *Gartenbauwissenschaft*, 1991, **56**: 130~133.
- [13] Widén B & Majdi H. Soil CO₂ efflux and root respiration at three sites in a mixed pine and spruce forest: seasonal and diurnal variation. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, **31**: 786~796.
- [14] Vose J M & Ryan M G. Seasonal respiration of foliage, fine roots, and woody tissues in relation to growth, tissue N, and photosynthesis. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 164~175.
- [15] Ryan M G, Lavigne M G & Gower S T. Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**: 871~883.
- [16] 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.

[17] Amthor J S. The McCree-de wit-penning de vries-thornley respiration paradigms: 30 years later. *Annals of Botany*, 2000, **86**: 1~20.

[18] Ryan M G, Hubbard R M, Pongracic S,*et al.* Foliage, fine-root, woody-tissue and stand respiration in *Pinus radiata* in relation to nitrogen status. *Tree Physiology*, 1996, **16**: 333~343.

[19] Burton A J, Pregitzer K S, Rues R W. Root respiration in North American forests: effects of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia*, 2002, **131**: 559~568.

[20] Edwards N T. Root and soil respiration responses to ozone in *Pinus taeda* L. seedlings. *New Phytologist*, 1991, **118**: 315~321.

[21] Lin G H & Ehleringer J R. Carbon isotopic fractionation does not occur during dark respiration in C₃ and C₄. *Plant Physiology*, 1997, **114**: 391~394.

[22] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* Special Issue. Controls on soil respiration: implications for climate change. Separating root and microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 115~146.

[23] Edmonds R L, Marra J L, Barg 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.

[24] 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.

[25] Ewel K C, Cropper W P Jr, Gholz H L. Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations. II. Importance of root respiration. *Can. J. For. Res.* , 1987, **17**: 330~333.

参考文献:

[2] 杨玉盛,董彬,谢锦升,陈光水,等. 林木根系呼吸及其测定方法进展. 植物生态学报,2004,**28**(3):426~434.

[6] 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.

[7] 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 含量及分配. 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.

[10] 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.

[11] 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(英文). 生态学报, 2003, **23**(7): 1278~1289.