

# 鼎湖山锥栗粗死木质残体雨季呼吸特征研究

杨方方<sup>1,2</sup>, 李跃林<sup>1</sup>

(1. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 采用 Li Cor6400-09 土壤呼吸测定系统, 基于多年气候图谱对于雨季的划分, 对鼎湖山自然保护区地带性森林季风常绿阔叶林优势种锥栗 (*Castanopsis chinensis*) 进行了雨季粗死木质残体的呼吸速率研究。2009 年雨季对锥栗 3 个腐解等级 (I、II、III) 粗死木质残体研究结果表明: 不同腐解等级粗死木质残体的呼吸速率具有相同的 CO<sub>2</sub> 释放特征, 即表现为相同的季节变化, 其呼吸速率的最大值出现在温度最高的 8 月。但不同腐解等级间呼吸速率差异显著, 变幅范围为 1.68 ~ 8.64 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。在树干温度、相对湿度及林内温度等环境因子与呼吸速率的关系表现上, 呼吸速率与粗死木质残体树干温度呈正相关 ( $R^2 > 0.70$ ,  $P < 0.001$ ), 与树干相对湿度呈负相关 ( $R^2 > 0.69$ ,  $P < 0.001$ )。Q<sub>10</sub> 值在 1.77 ~ 4.62 间变化, 表现为 I > III > II。

**关键词:** 锥栗; 粗死木质残体; 呼吸速率; 雨季; 鼎湖山

中图分类号: S664.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2010)10-0018-06

## Characteristics of respiration of coarse woody debris of *Castanopsis chinensis* in the wet season, Dinghushan natural reserve

YANG Fangfang<sup>1,2</sup>, LI Yue lin<sup>1</sup>

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510650, Guangdong, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Measurements of CO<sub>2</sub> fluxes released from coarse woody debris (CWD) of *Castanopsis chinensis*, were conducted with Li Cor6400-09 soil respiration system and a closed static chamber. Measurements were conducted in the monsoonal evergreen broadleaved forest in Dinghushan natural reserve, south China during the wet season from April to September in 2009. Wet season was defined based on the climate records of Dinghushan from 1994 to 2004. *C. chinensis*, with three decay class (I, II, III) CWD respiration rates during wet season had a same CO<sub>2</sub> emission pattern. The maximum CO<sub>2</sub> efflux rates occurred in August, when maximum air temperatures were recorded. Respiration rates varied significantly among the different decay classes, with mean maximum fluxes ranging between 1.68 and 8.64 μmol • m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Respiration was positively correlated with air temperature of CWD ( $R^2 > 0.70$ ,  $P < 0.001$ ) and negatively correlated with relative humidity of CWD ( $R^2 > 0.69$ ,  $P < 0.001$ ). The temperature coefficients (Q<sub>10</sub>) ranged from 1.77 to 4.62 for different decay classes, and I > III > II.

**Key words:** *Castanopsis chinensis*; coarse woody debris; respiration rate; wet season; Dinghushan natural reserve

收稿日期: 2010-01-10

基金项目: 广东省自然科学基金团队项目(8351065005000001); 国家重点基础研究发展计划项目(973计划项目)(2009CB421101); 国家生态系统网络鼎湖山站支撑项目

作者简介: 杨方方(1981-), 女, 河南长垣人, 博士研究生, 主要从事森林生态系统 C 循环研究; E-mail: ffyang@scib.ac.cn

粗死木质残体(Coarse woody debris, 简称CWD)通常是指不同分解等级的死木质体,包括完好的和已腐解的倒木、树桩、枯立木、大凋落枝及地下粗根残体<sup>[1]</sup>。大量研究证明CWD是森林生态系统中重要的结构性和功能性组成部分,并且在营养循环、生物多样性以及物种更新等方面扮演着重要角色<sup>[1-4]</sup>。CWD在全球碳循环方面的生物和非生物学过程也已逐渐成为研究的焦点<sup>[5-7]</sup>,其中许多研究集中在CWD对空气中二氧化碳源的潜在影响<sup>[7-9]</sup>。在北美和欧洲对CWD呼吸已开展了较为详尽的研究<sup>[10-12]</sup>,对于不同的林分类型和不同的树种个体而言,这些研究表明CWD呼吸与本身温度及含水量密切相关。近年来我国对CWD分解过程中CO<sub>2</sub>释放属性的研究已有相关报道,基于红松林、落叶松、水曲柳的CWD等为研究对象,在我国北方温带森林生态系统的研究表明CWD呼吸有明显的季节变化,呼吸速率与CWD温度、腐解等级密切相关<sup>[13-14]</sup>。

鼎湖山位于我国广东境内、被誉为北回归线上的绿色明珠。在鼎湖山分布的季风常绿阔叶林是南亚热带典型的地带性植被,属气候顶极型群落类型。鼎湖山植被类型的长期研究结果表明,随着森林植被的演替,早期的马尾松林经针阔叶混交林阶段,最终将过渡到季风常绿阔叶林<sup>[15]</sup>。鼎湖山季风常绿阔叶林是已有近400年历史的成熟森林,CWD贮量达38.54 Mg·hm<sup>-2</sup><sup>[16]</sup>,而呼吸作用导致CWD在分解过程中的质量损失达90%以上<sup>[2]</sup>。由于CWD呼吸通量数据极少,致使大多数森林生态系统CWD的CO<sub>2</sub>通量未知<sup>[9]</sup>,但CWD呼吸在贮量较大的季风常绿阔叶林中不容忽视。最新的研究结果表明,季风常绿阔叶林CWD贮量高达19.66 Mg C·hm<sup>-2</sup>,占地上生物量的14.54%,并以每年3.16 Mg·hm<sup>-2</sup>的速度输入<sup>[16]</sup>。随着我国生态公益林正在受到广泛重视,研究CWD的养分归还、CO<sub>2</sub>释放强度及其主要控制因子,有着重要的科学意义,而在我国南方尚缺乏对季风常绿阔叶林CWD呼吸特性的研究。锥栗 *Castanopsis chinensis* 是鼎湖山季风常绿阔叶林优势乔木,其生物量约占地上树种总生物量的45%<sup>[17]</sup>。同时,锥栗也是林内CWD的主要来源物种,其CWD占其所在森林生态系统总贮量的36%<sup>[16]</sup>。因此,科学评估锥栗CWD呼吸对生态系统碳收支平衡具有重

要意义。本研究采用Li Cor6400-09土壤呼吸测定系统,对鼎湖山季风常绿阔叶林锥栗CWD的CO<sub>2</sub>释放速率进行原位研究,以期为我国亚热带森林碳收支研究提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

研究地设在中国科学院鼎湖山森林生态系统定位研究站(简称鼎湖山站),也即鼎湖山国家级自然保护区,保护区总面积1155 hm<sup>2</sup>,位于广东省中西部,地理坐标为112°30′39″~112°33′41″E,23°09′21″~23°11′30″N,属典型的南亚热带季风湿润气候。年平均降雨量1956 mm,主要集中在4~9月,年均相对湿度为80.8%,年蒸发量1115 mm,年平均气温20.9℃,干、湿季明显。

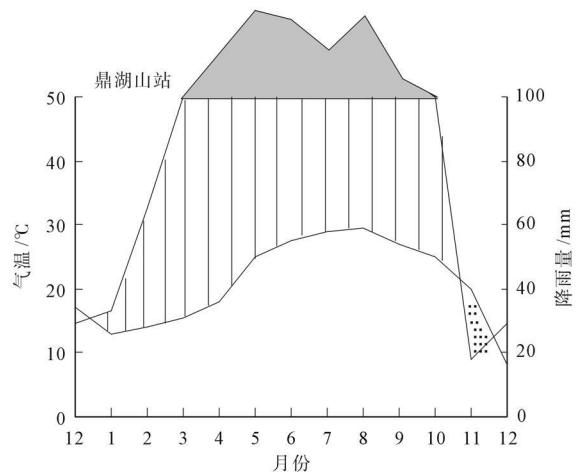


图1 鼎湖山站气候图谱(据季风常绿阔叶林样地气象观测塔1994年至2004年的气象数据)

Fig. 1 Climate diagram of Dinghushan based on records from 1994 to 2004 at the monsoon forest site meteorological station

实验样地位于保护区核心区内的三宝峰,坡向东北,坡度26°~33°,海拔270~300 m;土壤类型为赤红壤,土层深厚,表层有机质含量为29.4~42.7 g·kg<sup>-1</sup><sup>[18]</sup>。实验区植被类型为有近400年历史的南亚热带季风常绿阔叶林,植被覆盖率高达85%以上。季风常绿阔叶林群落结构复杂,成层现象明显,植物种类丰富,木本植物占绝对优势,蕨类和藤本植物也较多。该群落的主要优势种是锥栗 *C. chinensis*、木荷 *Schima superba* 和黄果厚壳桂

*Cryptocarya concinna*。

## 1.2 CWD 腐解等级划分

在季风常绿阔叶林 1 hm<sup>2</sup> 永久样地内设置 100 个 10 m × 10 m 样方, 每年对样地内的 CWD 现状进行调查并记录, 内容包括树种、大头直径、中央直径、小头直径、残干长度、腐解状态, 并尽可能登记新增 CWD 的倒地时间以及状态。长期的野外调查能够比较全面掌握 CWD 的现状, 科学划分腐解等级。由于季风常绿阔叶林高度腐解的 CWD 只占 CWD 贮量的 6%<sup>[19]</sup> 且在腐解后期木质体和土壤溶合。基于 Sollins<sup>[20]</sup> (1982) 制定的标准, 根据实际情况将季风常绿阔叶林内锥栗 CWD 分为如下 3 个腐解等级:

I 级: 倒木树皮、侧枝完整或已缺损, 边材完好。

II 级: 树皮大部分脱落, 边材部分腐烂。

III 级: 树皮全无, 边材大面积腐烂, 心材部分腐烂。

## 1.3 野外 CWD 呼吸测定方法

在 CWD 调查的基础上, 选择径级为 20~ 80 cm CWD 锥栗作为研究对象, 依照上述等级划分原则, 在三个腐解等级中各取 100 cm 长 CWD 样木 5 段, 随后在各样木上固定 PVC 连接环, PVC 连接环内径 101 mm、壁厚约 3 mm、高 50 mm。其固定方法为: 采用电动手钻在锥栗 CWD 上凿一个和 PVC 环吻合的圆槽, 用塑料锤轻敲使 PVC 环与树干紧密吻合, 并用密封胶密封 PVC 环与树干接触部位。利用 Li Cor6400 便携式光合作用测量系统配备 Li 09 土壤呼吸室测定土壤呼吸速率, 每月测定 2 次, 测定天气避免雨天, 同时考虑到鼎湖山森林生态系统土壤呼吸的特征, 在上午 9:00 左右测定的呼吸量反映了全天的平均释放量<sup>[21]</sup>, 本研究测定时间均选在上午 9:00 前后 2 h 进行。其中呼吸速度的计算需要 PVC 环内的 CWD 的表面积及其体积, 在实验布置时, 即进行环内 CWD 的表面积及环的体积测定, PVC 环内的表面积也即 CWD 树干测定面积, 用质地均匀的软纸弯曲成树干形状, 标记剪下, 再用叶面积测定仪测定; PVC 环体积的测定, 即密封 PVC 环的一端, 通过加水的方法, 随后用量筒量取所有注入 PVC 环的水的体积获得。

## 1.4 CWD 树干温湿度的测定

CWD 树干温度、相对湿度指标是通过 Li Cor6400-09 土壤呼吸测定系统自动获取; 其中 CWD 树干温度为树干表面温度, 也就是 PVC 环内温度; 相对湿度为树干表面相对湿度也就是 PVC 环内相对湿度, 而林内温度通过林内 H O B O 小气候观测站测定。

## 1.5 数据处理

所有数据均由 Li 6400 分析仪自动记录, 数据常规分析运用 Microsoft Excel 2003, 作图运用 Sigmaplot 8.0。其中 CWD 树干呼吸速率换算公式<sup>[22]</sup>如下:

$$R = R' \times V' \times n. \quad (1)$$

$$V' = V_0 + [V - (D/2)2 d]。 \quad (2)$$

$$n = 71.6 / S'。 \quad (3)$$

式(1)~(3)中:  $R$  为 CWD 树干呼吸速率,  $R'$  为系统测定记录的呼吸值,  $V$  为 PVC 环的体积,  $V_0$  为土壤呼吸腔室容积(991.0 mL),  $D$  为呼吸腔室插入的 PVC 环直径,  $d$  为土壤呼吸气室插入 PVC 环内的深度,  $S'$  为树干测定面积。

并用公式(4)进行 CWD 树干呼吸速率( $R$ )与 CWD 树干温度( $T$ )的拟合<sup>[23]</sup>

$$R = \beta_0 e^{\beta_1 T}。 \quad (4)$$

式(4)中,  $\beta_0$  和  $\beta_1$  为常数。

$Q_{10}$  是温度每升高 10 °C CWD 呼吸速率增加的倍数, 按式(5)计算  $Q_{10}$ <sup>[24]</sup>

$$Q_{10} = e^{10\beta_1}。 \quad (5)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 不同腐解等级 CWD 呼吸速率的季节变化特征

由图 2 可知, 不同腐解等级 CWD 呼吸速率存在明显的季节变化, CWD 呼吸呈单峰曲线, CWD 呼吸峰值出现在 8 月, 9 月出现下降趋势。CWD 3 个腐解等级(I、II、III)呼吸速率由 4 月到 8 月份分别增加了 39%、67% 和 68%, 其中腐解等级 II CWD 呼吸速率季节变化明显。

### 2.2 不同腐解等级 CWD 呼吸速率与 CWD 树干温度及相对湿度的关系

根据式(4)和式(5)得到锥栗 CWD 不同腐解等

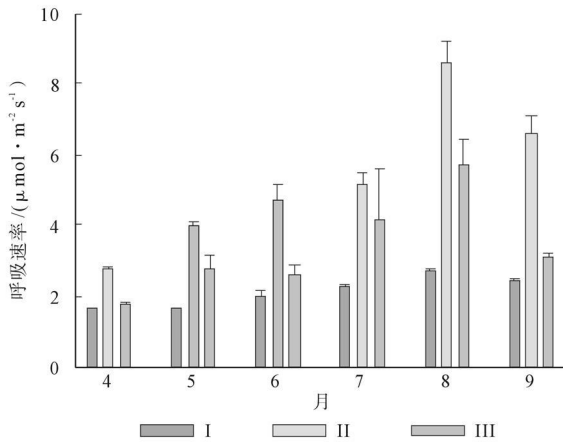


图 2 不同腐解等级 CWD 呼吸速率的季节变化特征  
Fig. 2 Seasonal dynamics of CWD respiration rate of different decay classes

级树干温度与树干呼吸模型参数, 并得到不同腐解等级 CWD  $Q_{10}$  值(表 1)。3 个腐解等级  $Q_{10}$  值变化范围在 1.77 ~ 4.62 之间( $R^2 = 0.70 \sim 0.82$ ), 其中腐解等级 I 的  $Q_{10}$  值最高。不同腐解等级间 CWD 呼吸速率变为, 等级 II 与等级 I、III 间存在显著差异( $P < 0.01$ ), 但等级 I、III 间无显著差异。由图 3 可知, 高度腐解 CWD 的平均呼吸速率值要比轻度分解的高; 同样, 由图 4 可知, 不同腐解等级 CWD 呼吸速率随着 CWD 树干相对湿度的增加而出现不同程度的衰减, 且 CWD 呼吸速率最小值出现在 CWD 相对湿度最高时。

表 1 不同腐解等级 CWD 呼吸速率与 CWD 树干温度间的关系  
Table 1 The relationship between CWD respiration rate and CWD stem temperature of different decay classes

腐解等级	模型	$R^2$	$P$	$Q_{10}$	样本数/个
I	$y = 21.59e^{0.153T}$	0.70	$< 0.01$	4.62	5
II	$y = 22.29e^{0.057T}$	0.82	$< 0.001$	1.77	5
III	$y = 25.42e^{0.059T}$	0.74	$< 0.001$	1.80	5

### 3 结论与讨论

本研究中不同腐解等级 CWD 呼吸速率与树干温度变化趋势非常一致, 随着树干温度的增加而升高, 这与先前的研究结果一致<sup>[9, 13-14]</sup>, CWD 呼吸的这种季节动态可能与鼎湖山林内土壤微生物生物量的季节动态相关<sup>[25]</sup>。试验过程中轻度分解的 CWD 呼吸  $Q_{10}$  最大, 说明其呼吸速率对树干温度变化比较敏感, CWD 呼吸  $Q_{10}$  值减小说明 CWD 在分

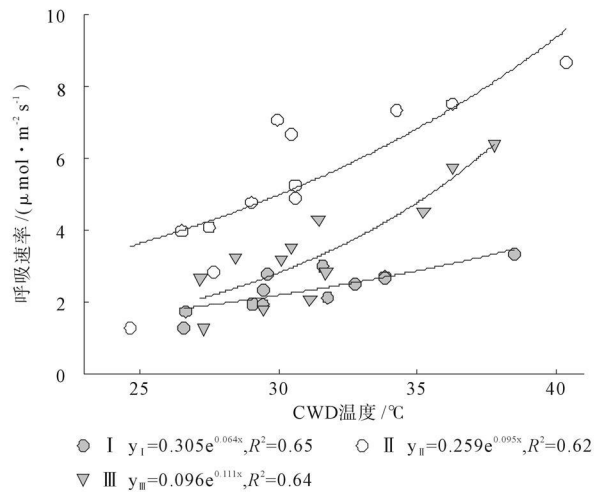


图 3 不同腐解等级 (I、II、III) CWD 呼吸速率与 CWD 树干温度的关系  
Fig. 3 The relationship between CWD respiration rate and CWD stem temperature of different decay classes (I, II, III)

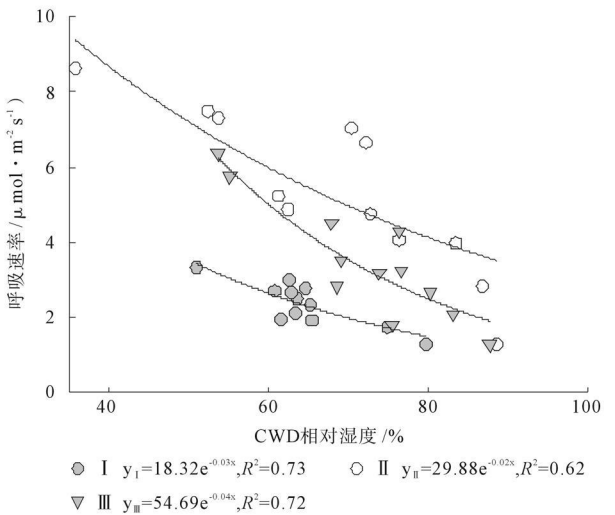


图 4 不同腐解等级 (I、II、III) CWD 呼吸速率与 CWD 树干相对湿度的关系  
Fig. 4 The relationship between CWD respiration rate and CWD stem relative humidity of different decay classes (I, II, III)

解过程中可能降低了对温度的敏感性, 这一结果与吴家兵等<sup>[14]</sup>在长白山的研究相一致。本实验中 CWD 呼吸  $Q_{10}$  值高于之前研究中树干呼吸的  $Q_{10}$  值<sup>[26-28]</sup>, 这与 CWD 在分解过程中大量增加的固氮细菌有关<sup>[2]</sup>, 也与试验地的高温环境 (试验地温度为 26°C ~ 40°C) 密切相关, 高腐解等级 CWD  $Q_{10}$  值

与鼎湖山土壤呼吸  $Q_{10}$  值相近(1.73)<sup>[29]</sup>。高度腐解 CWD 的平均呼吸速率值要比轻度腐解的高,这与 CWD 腐烂后接触面变大,微生物活动比较活跃有关<sup>[14,30]</sup>。腐解程度较高的 CWD 呼吸速率增加,这和 CWD 在分解后期,大量元素得到累积,白蚁等土壤动物增加相关<sup>[31]</sup>。相反,在高湿条件下(CWD 相对湿度大于 80%),CWD 分解生物的活性受到抑制从而降低 CWD 的呼吸速率。本研究结果表明:不同腐解等级 CWD 树干温度对 CWD 释放 CO<sub>2</sub> 起主导作用,从而影响 CWD 呼吸速率的季节变化。

不同腐解等级 CWD 分解释放 CO<sub>2</sub> 的速率不尽相同,导致这种差异的主要原因包括 CWD 树干温度,相对湿度以及腐解等级,此外,CWD 自身的结构和化学性质差异也可能是其主要原因。Marra & Edmonds<sup>[32]</sup> 研究发现不同树种 CWD 心材中含有不同的苯酚和萜烯(这两种成分可抑制 CWD 分解)。CWD 中含有的木质素以及蛋白质含量也是影响其分解的主要因子,其中心材中含有的黄酮类化合物等会在不同程度抑制 CWD 的分解<sup>[2,13]</sup>。CWD 在分解中释放 CO<sub>2</sub> 的过程主要是由微生物分解作用引起的生物过程,受被分解基质的微生物活性及环境因子的影响,在环境因子中,CWD 温度和含水量是影响分解的主要因子<sup>[2,9]</sup>。

本文采用土壤呼吸测定系统(Li cor6400-09)对锥栗 CWD 呼吸进行原位测定,这一方法与常用的碱吸收法和静态箱+气相色谱法相比,减小了对 CWD 及其周围环境因子的扰动,较能客观地反映锥栗 CWD 在原位分解过程中的呼吸特征。但本实验只对鼎湖山季风常绿阔叶林锥栗 CWD 呼吸及其主要影响因子间关系进行了初步分析,其它优势种 CWD,如黄果厚壳桂、荷木 CWD 的呼吸研究将加深对整个森林生态系统水平上 CWD 呼吸特征的生物学和非生物学过程的理解。此外,在野外实验的布置上,需要全面考虑环境因子如大气温、湿度、CWD 本身温、湿度及含水量等多种因子的交互作用,有必要进行一些相关控制实验。这些因子的综合分析将更一步帮助我们了解自然森林生态系统条件下 CWD 的呼吸特征,为揭示 CWD 呼吸机制提供客观依据。

## 参考文献:

- [1] Harmon M E, Sexton J. Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems[M]. US LTER Network Office, University of Washington, Seattle, WA, USA, 1996.
- [2] Harmon M E, Franklin J F, Swanson F J, *et al.* Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems[J]. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15: 133–302.
- [3] Currie W S, Nadelhoffer K J. The imprint of land use history: patterns of carbon and nitrogen in downed woody debris at the Harvard Forest[J]. *Ecosystems*, 2002, 5: 446–460.
- [4] Yan E R, Wang X H, Huang J J, *et al.* Long-lasting legacy of forest succession and forest management: Characteristics of coarse woody debris in an evergreen broad leaved forest of Eastern China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 252: 98–107.
- [5] Krankina O N, Harmon M E. Dynamics of the dead wood carbon pool in northwestern Russian boreal forests [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 82: 227–238.
- [6] Yatskov M, Harmon M E, Krankina O N. A chronosequence of wood decomposition in the boreal forests of Russia [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33: 1211–1226.
- [7] Guo L B, Bek E, Gifford R M. Woody debris in a 16 year old *Pinus radiata* plantation in Australia: mass, carbon and nitrogen stocks, and turnover [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 228: 145–151.
- [8] Knohl A, Kolle O, Minayeva T Y, *et al.* Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 231–246.
- [9] Wang C, Bond Lamberty B, Gower S T. Environmental controls on carbon dioxide flux from black spruce coarse woody debris [J]. *Oecologia*, 2002, 132: 374–381.
- [10] Bond Lamberty B, Wang C, Gower S T. Annual carbon flux from woody debris for a boreal black spruce fire chronosequence [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, 107: 8220.
- [11] Gough C M, Vogel C S, Kazanski C, *et al.* Coarse woody debris and the carbon balance of a north temperate forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 244: 60–67.
- [12] Barker J S. Decomposition of Douglas fir coarse woody debris in response to differing moisture content and initial heterotrophic colonization [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255: 598–604.
- [13] 王传宽, 杨金艳. 北方森林土壤呼吸和木质残体分解释放出的 CO<sub>2</sub> 通量[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 633–638.
- [14] 吴家兵, 关德新, 韩士杰, 等. 长白山地区红松和紫椴倒木呼吸研究[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 14–19.

- [15] 彭少麟. 南亚热带森林群落动态学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [16] Yang F F, Li Y L, Zhou G Y, *et al.* Dynamics of coarse woody debris decomposition rates in an old-growth forest in lower tropical China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259: 1666– 1672.
- [17] 温达志, 张德强, 魏平, 等. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林定位研究 V. 锥栗、黄果厚壳桂群落现存生物量、粗死木质残体贮量及凋落物动态[C] // 热带亚热带森林生态系统研究: 第8集. 北京: 气象出版社, 1998, 32– 39.
- [18] 何金海, 陈兆其, 梁永奕. 鼎湖山自然保护区之土壤[A]. 热带亚热带森林生态系统研究: 第1集[C] // 广州: 科学普及出版社广州分社, 1982, 25– 37.
- [19] 唐旭利, 周国逸, 周霞, 等. 鼎湖山季常绿阔叶林粗死木质残体的研究[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 484– 489.
- [20] Sollins P. Input and decay of coarse woody debris in coniferous stands in western Oregon and Washington [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1982, 12: 18– 28.
- [21] Tang X L, Liu S G, Zhou G Y, *et al.* Soil atmospheric exchange of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O in three subtropical forest ecosystems in southern China [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 546– 560.
- [22] 康博文, 刘建军. 采用 Li 6400– 09 土壤呼吸气室测量树干呼吸的方法改进[J]. *陕西林业科技*, 2006, (3): 47– 49.
- [23] Lavigne M B. Differences in stem respiration responses to temperature between balsam fir trees in thinned and unthinned stands [J]. *Tree Physiology*, 1987, 3: 225– 233.
- [24] 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 hard-wood forest [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217– 227.
- [25] 易志刚, 蚁伟民, 周丽霞, 等. 鼎湖山主要植被类型土壤微生物量研究[J]. *生态环境*, 2005, 14(5): 727– 729.
- [26] Meir P, Grace J. Scaling relationships for woody tissue respiration in two tropical rain forests [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25: 963– 973.
- [27] 王文杰, 王慧梅, 祖元刚, 等. 林木非同化器官与土壤呼吸的温度系数 Q<sub>10</sub>值的特征分析[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(4): 680– 691.
- [28] 严玉平, 沙丽清, 曹敏. 西双版纳热带季节雨林优势树种树干呼吸特征[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 23– 30.
- [29] 邓琦, 刘世忠, 刘菊秀, 等. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(9): 976– 986.
- [30] 侯平, 潘存德. 森林生态系统中的粗死木质残体及其功能[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(2): 309– 314.
- [31] 吕明和, 周国逸, 张德强. 鼎湖山黄果厚壳桂粗死木质残体的分解[J]. *广西植物*, 2006, 26(5): 523– 529.
- [32] Marra J L, Edmonds R L. Coarse woody debris and soil respiration in a clearcut on the Olympic Peninsula, Washington, USA [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26: 1337– 1345.

[ 本文编校: 吴 彬 ]