

# 鼎湖山自然保护区土壤有机碳、微生物生物量碳和土壤 CO<sub>2</sub> 浓度垂直分布

易志刚<sup>1,2</sup>, 蚁伟民<sup>2</sup>, 丁明懋<sup>2</sup>, 周丽霞<sup>2</sup>, 张德强<sup>2</sup>, 王新明<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所/有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650

**摘要:** 选取鼎湖山 3 种植被类型 (季风常绿阔叶林, 针阔叶混交林和马尾松林), 按 0~15, 15~30, 30~45 cm 土层取样, 测量了各土层土壤有机碳 (SOC) 质量分数, 熏蒸培养法测量了微生物生物量碳 (C<sub>mic</sub>), 同时用气象色谱法测量了地表和土壤 15、30、45、60 cm 处 CO<sub>2</sub> 体积分数, 并用静态箱/碱石灰吸收法测量了土壤呼吸速率。结果如下: (1) 随土层的加深, SOC 质量分数降低, 0~15 cm SOC 显著高于其他两层, 季风常绿阔叶林 SOC 显著高于其他两种植被类型; (2) 土壤碳密度和土壤有机碳含量垂直分布规律一致, 0~15 cm 土壤碳密度显著高于其他两层; (3) 0~30 cm 土层微生物生物量占总土壤微生物生物量的 81%~92%, 随土层加深微生物生物量迅速降低。微生物生物量和土壤有机碳的比值表明, 三种植被类型土壤均处于土壤碳积累中, 深层土壤碳积累程度高于表层; (4) 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度随土层的加深迅速升高, 主要与土壤透气性有关。  
**关键词:** 土壤有机碳, 土壤微生物生物量, 土壤 CO<sub>2</sub>, 垂直分布, 鼎湖山

中图分类号: S153.6<sup>†</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2006) 03-0611-05

土壤有机碳 (SOC) 不仅影响着土壤的物理特性和肥力, 还影响生物的生长和产量<sup>[1]</sup>, 是反映土壤质量或土壤健康的一个重要指标。此外, 土壤有机碳还可在一定程度上说明 N、P 等营养元素的可利用状态。土壤微生物生物量碳 (C<sub>mic</sub>) 是土壤营养库的一个重要组成部分, 其与土壤有机碳的比值是衡量土壤有机碳积累或缺失的一个重要指标<sup>[2-3]</sup>。同时, 土壤微生物参与土壤呼吸的过程, 分解土壤有机质释放 CO<sub>2</sub>, 在森林生态系统物质循环及能量流动过程中起重要作用<sup>[4]</sup>。不同土层微生物数量和活性不同, 在土壤有机质分解中所起的作用不同, 从而可能导致土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的垂直差异。

本研究选取鼎湖山自然保护区植被演替不同阶段的三种典型植被类型, 即季风常绿阔叶林 (BF)、针阔叶混交林 (MF) 和马尾松林 (PF) 为研究对象, 分别测量了不同土层 SOC 含量和 C<sub>mic</sub>, 同时测量了土壤呼吸和不同土壤深度 CO<sub>2</sub> 浓度, 并探讨了他们之间的相互关系。

## 1 样地概况

鼎湖山国家级自然保护区建于 1956 年, 位于东经 112° 35', 北纬 23° 08', 在广东省中部, 属丘陵区。鼎湖山地处热带和亚热带的过渡区, 属季风南亚热带湿润气候, 雨热同期, 干湿季节明显。

年平均气温 21 °C, 年平均降水量为 1927 mm, 相对湿度达 80% 以上<sup>[5]</sup>。土壤类型主要为赤红壤、黄壤和山地灌丛草甸土。自然植被有季风常绿阔叶林、沟谷雨林、常绿阔叶林、针阔叶混交林、针叶林、河岸林、稀树灌丛和灌木草丛。本研究选取的三个样地基本特征见表 1。

表 1 实验地概况

Table 1 The description of experiment plots at DBR

植被类型	海拔/m	土壤特征 <sup>a</sup>				
		pH	容重 (g·cm <sup>-3</sup> )	有机碳 (g·kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg·kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg·kg <sup>-1</sup> )
BF	270~300	3.7	0.91	27.0	7.03	4.97
MF	200~240	3.8	1.05	15.7	6.97	5.80
PF	70~80	4.3	1.50	9.5	6.13	5.96

<sup>a</sup> 0~15 cm 土壤

## 2 研究方法

### 2.1 土壤样品的采集

2003 年 2 月和 7 月在每种植被类型下随机选取 7 个点, 按 0~15、15~30、30~45 cm 用土钻采取土样, 带回实验室充分混匀并分成两份, 一份自然风干后过 2 mm 筛, 放在 4 °C 冰箱中备用, 用于测量土壤微生物生物量; 另一份风干保存, 供化学分析用。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2002CB410803); 国家自然科学基金项目 (3017019)

作者简介: 易志刚 (1973-), 男, 博士研究生, 主要从事土壤生态环境及土-气界面研究。Tel: +86-20-31971472; E-mail: zgyi@gig.ac.cn

\*通讯作者, E-mail: wangxm@gig.ac.cn

收稿日期: 2005-12-31

## 2.2 C<sub>mic</sub>的测定

氯仿熏蒸培养法<sup>[6]</sup>。土壤微生物矿化速率取0.41<sup>[6-7]</sup>。

## 2.3 SOC 测量

重铬酸钾外加热法<sup>[8]</sup>。

## 2.4 CO<sub>2</sub> 采样与测量

埋管法。实验前6个月将PVC管埋到土壤不同深度(15、30、45、60 cm)，露出土壤一端PVC管用橡胶塞密封。采样时用100 mL医用注射器从管内抽取50 mL气体带回实验室分析，每个样地7个重复。CO<sub>2</sub>用气相色谱法分析<sup>[9]</sup>。

## 2.5 土壤呼吸速率的测量

采用静态箱/碱石灰吸收法<sup>[10]</sup>，每个样地7个重复。

## 2.6 数据分析处理

不同土层SOC、C<sub>mic</sub>和土壤CO<sub>2</sub>浓度差异用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验，不同植被类型差异也采用One-way ANOVA分析，2月和7月间差异采用独立样本T检验，显著性水平均为p=0.05。数据在SPSS 10.0分析完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤有机碳含量和碳密度垂直分布

0~15、15~30、30~45 cm SOC质量分数平均值为1.7%、0.7%、0.4%，表层SOC显著高于下层，与该地区已有报道相一致<sup>[11]</sup>。同一土层不同植被类型SOC也有差异，BF>MF>PF，其中0~15 cm SOC三种林型差异显著，15~30 cm SOC BF显著MF和PF。不同林型SOC含量高低与凋落物输入量和微生物分解速率有关。研究表明：3种主要植被类型凋落物量(t·hm<sup>-2</sup>)分别为：8.28(BF)，8.50(MF)和3.31(PF)，凋落物年平均分解速率为：49.16%(BF)，40.85%(MF)，36.94%(PF)<sup>[12]</sup>。分解速率的大小与微生物活性有关。有关研究表明，该地区土壤微生物数量和土壤微生物生物量变化规律与土壤有机碳含量的变化规律相一致<sup>[10]</sup>，该变化规律在其他地区也有相关的报道<sup>[13]</sup>。三种林型中，7月各土层SOC略高于2月，但差异并不显著(图1)。

和SOC垂直分布相一致，土壤碳密度随土层深度而降低，和方运霆等报道相同<sup>[11]</sup>。0~15 cm土壤碳密度(t·hm<sup>-2</sup>)分别为49.4(BF)，26.9(MF)，21.4(PF)，显著高于其他两层(图2)。0~15 cm土壤碳密度BF显著高于MF和PF，但MF和PF间土壤碳密度差异并不显著，0~15 cm以下土层三个林型土壤碳密度均不存在显著差异。从以上分析可知，不同植被类型间SOC和土壤碳密度差异集中在土壤表层，表明在植被演替过程中，土壤碳的变

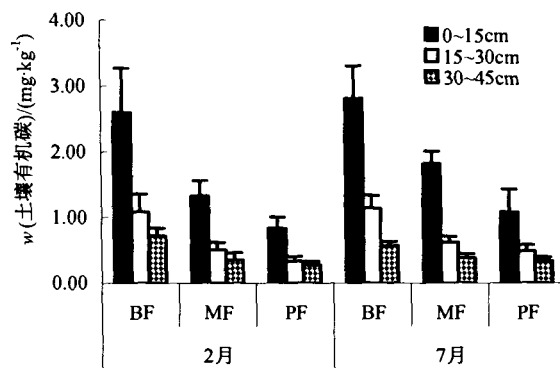


图1 鼎湖山不同植被类型土壤有机碳垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of soil organic carbon in different forest types

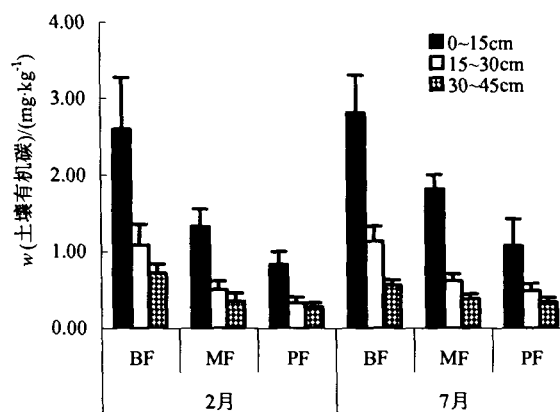


图2 鼎湖山不同植被类型土壤碳密度垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of soil carbon density in different forest types

化主要发生在0~15 cm土层，深层土壤有机碳含量和土壤碳密度随群落演替变化的幅度较小。

### 3.2 土壤微生物生物量碳垂直变化

随着土层的加深，C<sub>mic</sub>迅速下降，0~30 cm的C<sub>mic</sub>占土壤总微生物生物量的81%~92%(表2)。该地区土壤微生物生物量的垂直分布与已有其他

表2 鼎湖山主要植被类型土壤微生物生物量和土壤有机碳比值的垂直变化

Table 2 Vertical change of the ratio of C<sub>mic</sub> to SOC in the main vegetation types in DBR

植被类型	土层/cm	微生物生物量/(mg/kg)	土壤有机碳/(g/kg)	C <sub>mic</sub> : SOC/%
BF	0~15	595±94	28.05±4.94	2.12
	15~30	385±124	11.35±1.98	3.39
	30~45	210±112	5.61±0.67	3.75
MF	0~15	265±68	18.14±1.85	1.46
	15~30	146±63	6.17±0.93	2.37
	30~45	96±50	3.81±0.63	2.52
PF	0~15	475±85	10.76±3.47	4.41
	15~30	288±152	4.87±0.91	5.92
	30~45	66±22	3.42±0.59	1.94

地区报道基本一致<sup>[13-14]</sup>。表层土壤微生物生物量碳分布均匀，变异系数较小，为 15.7%~25.7%，而深层土壤微生物变异达 32.1%~53.1%，主要是受根分布的影响。土壤微生物主要包括根际微生物和自由生活的微生物两部分，表层根分布较为均匀，根际微生物变化较小，而深层根生物量变化较大，从而导致深层根际微生物变异较大。 $C_{mic}$  和 SOC 的比值 ( $C_{mic}/SOC$ ) 是衡量土壤有机碳积累或损失的一个重要指标，该比值越高表示土壤碳的积累<sup>[2-4]</sup>。处于鼎湖山顶级群落的 400 年自然林碳循环基本达到平衡状态， $C_{mic}/SOC$  为 1.95%<sup>[15]</sup>。本研究三种林型该值为 1.46~5.92，土壤碳素均处于积累之中。除马尾松林 30~45 cm 外，随土层的加深， $C_{mic}/SOC$  值增加，说明深层土壤碳积累强度高于表层土壤，土壤有机碳逐渐由土壤表层向土壤深层转移。

### 3.3 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度垂直分布与土壤呼吸

土壤 CO<sub>2</sub> 主要来自于土壤呼吸，包括根呼吸，微生物呼吸和土壤动物呼吸<sup>[16]</sup>。土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数显著高于大气 CO<sub>2</sub> 浓度，且随土层加深迅速递增(图 3)。土壤 CO<sub>2</sub> 体积分数的垂直变化可以从以下方面

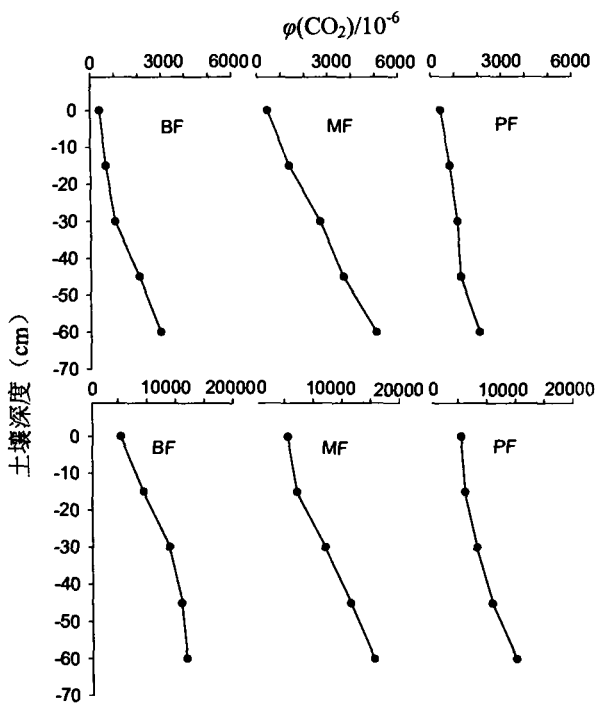


图 3 鼎湖山不同植被类型土壤 CO<sub>2</sub> 浓度垂直分布  
上：2003 年 2 月；下：2003 年 7 月

Fig. 3 vertical distribution of Soil CO<sub>2</sub> concentration in different forest types

深层土壤 CO<sub>2</sub> 扩散较慢，在深处积累，导致 CO<sub>2</sub> 浓度较高<sup>[17]</sup>。梁福源等研究表明，土壤空气中 CO<sub>2</sub> 浓度的垂直分布与土壤微生物数量有一定的正相关性<sup>[18]</sup>，本研究结果表明土壤微生物生物量均随着土层深度的增加而降低，而土壤 CO<sub>2</sub> 浓度随土层深度的增加而增加，两者呈现一定的负相关性。土壤微生物与土壤 CO<sub>2</sub> 浓度之间的关系有待于进一步深入研究。

土壤微生物和根呼吸产生的 CO<sub>2</sub>，由土壤表层扩散到空气中，不同植被类型差异较大。BF 土壤呼吸速率明显高于 MF 和 PF (图 4)，与周存宇等

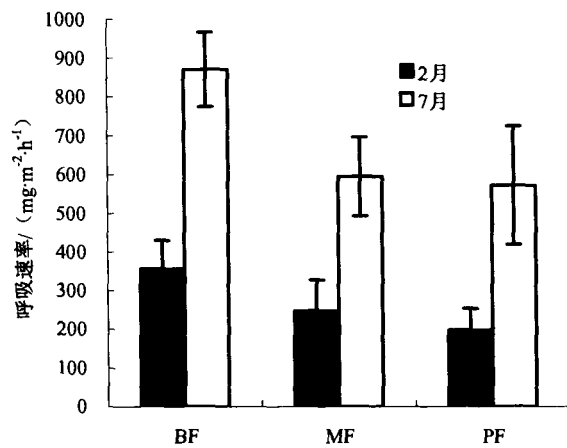


图 4 鼎湖山不同植被类型土壤呼吸速率  
Fig. 4 Soil respiration rates of different forests

报道相一致<sup>[9]</sup>。林型间差异可能与微生物活性，凋落物数量和分解速率有关<sup>[10-12]</sup>。从图 4 还可以看出，7 月土壤呼吸速率均显著高于 2 月 ( $p < 0.05$ )，主要与温度，土壤含水量和植物生长相关。鼎湖山 7 月平均气温 28 °C，降雨量 240.3 mm，2 月平均气温为 13.8 °C，降雨量 60.7 mm<sup>[5]</sup>，雨热同期，有利于微生物的生长活动。另外，植物生长也影响土壤呼吸变化。根据鼎湖山物候观测，植物抽芽和长叶集中在 3~5 月，这个期间土壤温度逐渐回升，7 月雨水充足，适宜于植物的生长，根呼吸旺盛。同时通过根向土壤运输的有机物较多，也有利于根际微生物的活动，微生物活动加强，呼吸强度增加。

## 4 结论

- (1) 土壤有机碳含量和土壤有机碳密度随土层的加深而递减。不同植被类型间差异较大，主要与凋落物输入的碳量和微生物分解速率有关。
- (2) 土壤微生物生物量碳随土层的加深而递减，主要受植物根生物量的垂直分布的影响。

解释：虽然植物根和土壤微生物主要集中在土壤表层，但由于表层土壤疏松，由根呼吸和微生物呼吸产生的 CO<sub>2</sub> 很快就通过气体交换而释放到空气中，

(3) 土壤微生物生物量碳与土壤有机碳的比值表明, 鼎湖山土壤处于碳积累, 土层越加深, 土壤碳积累程度越强, 土壤有机碳逐渐由土壤表层向土壤深层转移。

(4) 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度随土层的加深而增加, 主要是由于表层土壤疏松, 与大气交换较快, 而深层土壤空气扩散较慢, CO<sub>2</sub> 在深层积累。

#### 参考文献:

- [1] 王艳芬, 陈佐忠, Tieszen L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545-551.  
WANG Yanfen, CHEN Zuozhong, Tieszen L T. Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilingguole, Inner Mongolia, China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1998, 22(6): 545-551.
- [2] DING M, Yi W, Liao L, et al. Effect of afforestation on microbial biomass and activity in soils of tropical China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24: 865-872.
- [3] INSAM H, DOMSCH K H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites [J]. Microbial Ecology, 1988, 15: 177-188.
- [4] 蚁伟民, 傅声雷, 周存宇, 等. 鹤山人工林和鼎湖山自然林土壤微生物生物量的研究[J]. 生态学报[J], 1995, 15(Supp.A): 141-147.  
YI Weiming, FU Shenglei, ZHOU Cunyu, et al. A study on soil microbial biomass in artificial and natural forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 1995, 15 (Supp. A): 141-147.
- [5] 黄展帆, 范征广. 鼎湖山的气候[J]. 热带亚热带森林生态系统研究, 1982, 1: 11-16.  
HUANG Zhanfan, FAN Zengguang. The climate of Dinghushan[J]. Tropical and Subtropical Forest Ecosystem, 1982, 1: 11-16.
- [6] JENKINSON D S, POWLSON D S. The effects of biocidal treatment on metabolism in soil. V. A method for measure soil microbial biomass [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1976, 8: 209-213.
- [7] ANDERSON J P E, DOMSCH K H. Mineralization of bacteria and fungi in chloroform-fumigated soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1978, 10:207-213.
- [8] ANDERSON J M, INGRAM J S. Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods [M]. CAB Internation, Wallingford, Oxford, England, 1989.
- [9] 周存宇, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山森林地表 CO<sub>2</sub> 通量及其影响因素的研究[J]. 中国科学 D 辑, 2004, 34(增刊 II): 175-182.  
ZHOU Cunyu, ZHOU Guoyi, ZHANG Deqiang, et al. Flux of forest soil surface CO<sub>2</sub> in Dinghushan and its influence factors [J]. Science in China Series D, 2004, 34 (Supp. II): 175-182.
- [10] 易志刚, 蚁伟民, 丁明慧, 等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳排放研究[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 207-212.  
YI Zhigang, YI Weimin, ZHOU Lixia, et al. Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 207-212.
- [11] 方运霆, 莫江明, BROWN S, 等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. 生态学报, 2004, 24 (1): 135-142.  
FANG Yunting, MO Jiangming, BROWN S, et al. Storage and distribution of soil organic carbon in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (1): 135-142.
- [12] 张德强, 叶万辉, 余清发, 等. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 938-944.  
ZHANG Deqiang, YE Wanhui, YU Qinfa, et al. The litter-fall of representative forests of successional series in Dinghushan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20 (6): 938-944.
- [13] 赵吉, 郭婷, 邵玉琴. 内蒙古典型草原土壤微生物生物量及其周转与流通量的初步研究[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2004, 35(6): 673-676.  
ZHAO Ji, GUO Ting, SHAO Yuqin. Preliminary studies on soil microbial biomass and its turnover in typical grasslands of Nei Mongol region [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol, 2004, 35(6): 673-676.
- [14] MICHELSEN A, ANDERSSON M, JENSENA M, et al. Carbon stocks, soil respiration and microbial biomass in fire-prone tropical grassland, woodland and forest ecosystems [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36: 1707-1717.
- [15] 邓邦权, 吕禄成. 鼎湖山自然保护区不同林型下土壤微生物生物化学过程强度的研究: I. 不同土壤含碳物质的矿化与土壤微生物的代谢活性和生物量[J]. 热带亚热带森林生态系统研究, 1986, 4: 53-63.  
DENG Bangquan, LU Lucheng. Study of microbes and biochemical activity of different forest soils in Ding Hu Shan Biosphere Reserve I. Microbial activity and biomass in relation to mineralization of carbonaceous matter of different forest soils [J]. Tropical and Subtropical Forest Ecosystem, 1986, 4: 53-63.
- [16] SINGH J S, GUPTA S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystem [J]. Botanical Review, 1977, 43: 449-528.
- [17] JASSAL R S, BLACK T A, DREWITT G B, et al. A model of the production and transport of CO<sub>2</sub> in soil: predicting soil CO<sub>2</sub> concentrations and CO<sub>2</sub> efflux from a forest floor [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124: 219-236.
- [18] 梁福源, 宋林华, 王富昌, 等. 路南石林地区土壤空气中 CO<sub>2</sub> 浓度分布规律与土下溶蚀形态研究[J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 180-187.  
LIANG Fuyuan, SONG Linhua, WANG Fucang, et al. the case study of subsoil solution features and soil CO<sub>2</sub> concentration in stone forest region, Lunan, Yunnan, China [J]. Carsologica Sinica, 2000, 19(2): 180-187.

## Vertical distribution of soil organic carbon, soil microbial biomass and soil CO<sub>2</sub> concentration in Dinghushan Biosphere Reserve

YI Zhigang<sup>1</sup>, YI Weimin<sup>2</sup>, ZHOU Lixia<sup>2</sup>, Ding Mingmao<sup>2</sup>, ZHANG Deqiang<sup>2</sup>, WANG Xinming<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry//Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

**Abstract:** Soil samples were collected in 0~15, 15~30 and 30~45cm soil depth in February and July 2003 in three typical forest types in DBR. Soil organic carbon (SOC), soil microbial biomass carbon ( $C_{mic}$ ) were measured. CO<sub>2</sub> concentrations of soil surface and in the 15, 30, 45, 60 cm depth soils, and soil respiration rates were measured at the same time. The results were as follows: (1) SOC decreased with soil depth, with the significantly higher content in 0-15 cm layer than those in other two layers. SOC content in BF is significantly higher than that in MF and PF. (2) Soil carbon density also decreased with soil depth, with the significantly higher content in 0-15 cm layer than those in other two layers. (3)  $C_{mic}$  decreased quickly with the depth of soil, with 81-92% of  $C_{mic}$  existing in 0-30 cm deep soils. The  $C_{mic}$  to SOC ratios (1.46-5.92%) of different soil profiles suggested that SOC were in accumulation, and the accumulation rates increased with soil depth, which suggesting that SOC were transferred from surface soil to deep soil. (4) Soil CO<sub>2</sub> concentration increased sharply with soil depth, this might be ascribed to the very low CO<sub>2</sub> diffusivity at deep soils.

**Key words:** soil organic carbon; soil microbial biomass; soil CO<sub>2</sub> concentration; vertical distribution; Dinghushan Biosphere Reserve