DOI: 10.5846/stxb201401230171
向慧敏, 温达志, 张玲玲, 李炯.鼎湖山森林土壤活性碳及惰性碳沿海拔梯度的变化.生态学报,2015,35(18): - .
Xiang H M, Wen D Z, Zhang L L, Li J.Altitudinal changes in active and recalcitrant soil carbon pools of forests in the Dinghu Mountains.Acta Ecologica Sinica,2015,35(18): - .

# 鼎湖山森林土壤活性碳及惰性碳沿海拔梯度的变化

向慧敏[1,2,3], 温达志[1,2,*], 张玲玲[1,2], 李　炯[1,2]
1 中国科学院华南植物园环境生态学实验室, 广州　510650
2 中国科学院华南植物园植被恢复与退化生态系统管理重点实验室, 广州　510650
3 中国科学院大学, 北京　100049

**摘要**:本文对鼎湖山 3 个不同海拔高度下的沟谷雨林(LA)、低地常绿阔叶林(MA)和山地常绿阔叶林(UA)的土壤活性碳库和惰性碳库进行了研究。结果表明:(1)土壤总碳库仅在 30—45 cm 土层中存在显著差异且碳库大小随着海拔的增加而增加。(2)土壤微生物生物量碳(MBC)碳库在 0—15 cm 是 LA 和 MA 显著大于 UA,在 30—45 cm 是 MA 和 UA 显著高于 LA,在 45—60 cm 土层中 MA 最大。水溶性碳(WSOC)和颗粒碳(POC)碳库均不随海拔高度而改变。WSOC 碳库占总碳库的百分比仅在 30—45 cm 土层中存在差异且大小顺序为:LA>UA>MA,POC 碳库占总碳库的百分比仅在土层 15—30 cm 上存在显著差异且 MA 比值最大。易氧化性碳(ROC)碳库及占总碳库百分比都是在表层土壤(0—15 cm)中产生显著变化,且 UA 极显著地大于 LA 和 MA。(3)惰性碳(RC)碳库仅在深层土壤中存在显著差异且 MA 中 RC 碳库最大,UA 次之,LA 最小。RC 碳库占总碳库比值仅在表层土壤 0—15 cm 存在显著差异且 UA 最大。表层土壤中 ROC 碳库和 RC 碳库占总碳库百分比的增加是导致本研究中高海拔森林土壤总碳库最大的主要原因。(4)不同海拔高度上森林土壤理化性质与土壤碳库组成存在显著相关,土壤理化性质的改变是引起不同海拔梯度森林土壤碳库组成变化的重要原因。

**关键词**:南亚热带森林; 海拔梯度; 土壤有机碳; 微生物碳; 水溶性碳; 颗粒碳; 易氧化性碳; 惰性碳

# Altitudinal changes in active and recalcitrant soil carbon pools of forests in the Dinghu Mountains

XIANG Huimin[1,2,3], WEN Dazhi [1,2,*], ZHANG Lingling[1,2], LI Jiong[1,2]
1 *Institute of Ecology and Environmental Sciences, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510650, *China*
2 *Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510650, *China*
3 *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

**Abstract**: Active and recalcitrant carbon (RC) fractions are two important components of soil organic carbon (SOC). The active SOC fractions with short turnover times, including microbial biomass carbon (MBC), water-soluble organic carbon (WSOC), particulate organic carbon (POC), and readily oxidizable carbon (ROC), are considered biologically available sources of carbon (C) and respond faster to environment changes than total SOC. Recalcitrant carbon with long turnover times may be indicative of the long-term positive feedback of soil decomposition in a warming world. Study of these two C fractions can help us to understand the dynamics of SOC. In this study, our aim was to evaluate the dynamics of SOC along an elevation gradient in Southern China. To this end, an experiment was conducted in the Dinghu Mountains (also called Dinghushan Nature Reserve) of subtropical China to investigate changes in the active and recalcitrant soil carbon pools in a

**基金项目**:中国科学院战略性先导科技专项课题"中国森林生态系统固碳现状、速率、机制和潜力"(XDA05050205)
**收稿日期**:2014-01-23;　　**网络出版日期**:2014-11-19
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: dzwen@ scib.ac.cn

ravine rainforest (LA), a lowland monsoon evergreen broadleaf forest (MA), and an upland monsoon evergreen broadleaf forest (UA), which represent low, middle, and high altitudes, respectively. In all three forests, active and recalcitrant C were measured at four soil depths (0—15, 15—30, 30—45, and 45—60 cm), and physicochemical properties of the soil were assessed. The results showed that water content, total nitrogen (N), hydrolysable-N, and available potassium decreased with an increase in altitudinal gradient. The C/N ratio similarly increased with an increase in altitudinal gradient, and the ratio was significantly higher in UA than in MA and LA. pH and bulk density were also highest in UA and were in the order of MA<LA<UA. The results also suggested that C stocks increased with an increase in altitudinal gradient; however, a significant difference among the three forest types was only found in the 30—45 cm soil layer. The MBC pool in the 0—15 cm soil layer was significantly higher in LA and MA than in UA; however, the pool in the 30—45 cm soil layer was significantly higher in MA and UA than in LA, and the highest value of MA was recorded in the 45—60 cm soil layer. In contrast, neither the WSOC pool nor the POC pool of the forests showed altitudinal variation. The percentage of WSOC pool to C stock in the 30—45 cm soil layer of the three forests was in the order of LA>UA>MA. The percentage of POC pool to C stock among the three forests differed significantly only in the 15—30 cm soil layer and the value was highest in MA. The size of the ROC pool and the percentage of ROC pool to C stock in the 0—15 cm soil layer were significantly higher in UA than in LA and MA. Among the three forests, the size of the RC pool was in the order of MA>UA>LA, although a significant difference was found only in the 30—45 cm and 45—60 cm soil layers. The percentage of RC pool to C stock in the 0—15 cm soil layer was highest in UA. In conclusion, the increasing ROC pool and the percentage of RC pool to C stock in the surface layer along the altitudinal gradient contribute to the largest stock of carbon in UA. Furthermore, the significant relationship between C fraction pools and soil physicochemical properties suggested that changes in soil physicochemical properties might be an important factor contributing to alterations in the C constitution of forests soils along the altitudinal gradient.

**Key Words**: lower subtropical forests; altitudinal gradient; soil organic carbon; microbial biomass carbon; water-soluble organic carbon; particulate organic carbon; readily oxidizable carbon; recalcitrant carbon

土壤是陆地碳循环中最大的碳库,储存在其中的碳是大气中的两倍,全球土壤碳储量为 1500 Pg,其中40%是储存在森林生态系统中[1];森林土壤是一个重要的碳库,森林土壤碳吸存在降低大气二氧化碳浓度并减少温室效应中具有重要作用[2]。森林土壤有机质的变化常受很多外界因素的影响,如气候、植被、有效性营养物质、外界干扰活动、土地利用和管理手段等[3-4],同时土壤的物理性质,如土壤结构、土壤颗粒大小、土壤物理组成等都对土壤碳积累具有深远影响。在过去的几十年里,全球变暖以及由此而产生的温室效应引起了全世界广泛的关注,也由此产生了一系列关于土壤有机质质量、种类以及分布的研究[5-7]。近年来,围绕海拔梯度上自然林土壤碳库组成的分布和变化等的研究逐渐增多,这是因为海拔梯度变化作为一种自然地理变化,它对森林土壤理化性质、植被分布以及因植被密度不同导致凋落物量的变化都有较大影响[8-10],而这些因素的变化又会直接或间接的影响森林土壤碳库大小及碳库组成的变化,因此,研究森林土壤碳库随海拔梯度的变化是非常有必要的。研究表明[11],海拔梯度变化是影响土壤有机碳含量的综合和主导因素,土壤有机碳含量总体上呈随海拔上升而升高的变化趋势。但不尽然如此,例如,胡宗达[12]等研究表明表层土壤总有机碳含量随海拔增加呈现由低到高再下降的趋势,亚层土壤则随海拔升高呈增加趋势。Sheikh 等[13]研究发现,Garhwal Himalaya 地区亚热带松果林和温带阔叶林有机碳库均随海拔升高而降低,其中松果林碳储量由 185.6 t C/hm$^2$降到 160.8 t C/hm$^2$,阔叶林由 141.6 t C/hm$^2$降到 124.8 t C/hm$^2$。向成华等[14]研究认为,海拔较高地区植被类型具有较高的土壤活性有机碳含量和分配比例。Zhang 等[10]报道了长白山森林土壤有机碳含量不随海拔梯度而变化,但高海拔森林的土壤水溶性碳、微生物碳和易氧化性碳含量却显著大于中间海拔梯度森林。这些研究多侧重于海拔高度对森林土壤总有机碳库和活性碳库变化方面的研究,较少关注土壤惰性碳库

随海拔高度变化规律的研究。

通常,土壤碳库是由活性碳库(active pool,周转期在 0.1—4.5 a)、缓性碳库(slow pool,周转期在 5—50 a)和惰性碳库(passive pool,周转期在 50—3000 a)组成[15],其中活性碳库和惰性碳库是土壤碳库的重要组成部分。土壤活性碳库是土壤碳库的重要敏感性指标,如微生物碳、水溶性碳、颗粒碳和易氧化性碳是可利用的生物碳源,其对周围环境的变化可作出迅速响应[16-18],土壤惰性碳库则是衡量土壤碳库积累及碳稳定性的重要指标,因其非常稳定且周转时间长,常常作为全球变化影响下土壤对环境长期变化的响应指标[19]。因此,全面而系统的研究土壤活性碳库和惰性碳库随海拔梯度的变化规律,可揭示海拔高度对土壤碳库组成和动态变化的影响。本研究选取位于鼎湖山 3 个不同海拔高度上的代表性森林,即沟谷雨林(LA)、低地常绿阔叶林(MA)和山地常绿阔叶林(UA)为对象,研究其土壤活性碳库和惰性碳库沿海拔高度的变化规律,旨在阐明不同海拔高度上森林土壤碳库组成的变化趋势及影响碳库组成变化的重要因子。

## 1　材料与方法

### 1.1　研究地概况

鼎湖山位于广东省境内,东距广州市 86 km,西距肇庆市 18 km(112°30′39″—112°33′41″ E, 23°09′21″—23°11′30″ N),总面积 1155 $hm^2$,是我国最早的自然保护区之一。该区气候受东太平洋和南海海洋气流的影响,属南亚热带季风气候,年均气温 20.9 ℃,最冷月(1 月)和最热月(7 月)的平均温度分别为 12.6 ℃和 28.1 ℃,年降雨量存在明显的季节分配,4—9 月为湿季,10 月至次年 3 月为旱季, 年均相对湿度 81.5%[20]。该区大面积为丘陵和低山,海拔在 50—800 m 之间,自低海拔至高海拔分别包括沟谷雨林(LA)、低地常绿阔叶林(又称为季风常绿阔叶林)(MA)、山地常绿阔叶林(UA),林地概况见表 1。

**表 1　不同海拔高度上林地概况**

**Table 1　The profile of the forests along a ravine rainforest (LA), a lowland monsoon evergreen broadleaf forest (MA) and an upland monsoon evergreen broadleaf forest (UA)**

| 林型 Forest type | 海拔/m Elevation | 优势树种[21] Dominant trees | 地上生物量/($t\ hm^{-2}$)[21] Above-ground biomass | 凋落物产量/($g/m^2$)[22] Production of litterfall | 年平均温度/℃ Annual temperature | 大气相对湿度 Relative humidity of air | 土壤类型 Soil type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 沟谷雨林 LA | 145 | 凸脉榕(*Ficusner vosa*)、鱼尾葵(*Cary ota ochlandra*)、假苹婆(*Sterculia lanceolata*)、水石梓(*Sarcosperma laurinum*)龙眼(*Dimocarpus longan*)、白颜树(*Gironniera subaequalis*) | 326.93 | 1061 | 20.4 | 87% | 水化赤红壤 |
| 低地常绿阔叶林 MA | 231 | 锥栗(*Castanopsis chinensis*)、荷木(*Schima superba*)、厚壳桂(*Cryptcarya*)、乌榄(*Canarium pimela*)、云南银柴(*Aporosa yunnanensis*)、华润楠(*Machilus chinensis*) | 398.62 | 849 | — | — | 赤红壤 |
| 山地常绿阔叶林 UA | 614 | 鼎湖杜鹃 *Rhododend ron tinghuense*)、白皮黄杞(*Engelhardtia fenzelii*)、硬斗柯(*Lithocarpus hancei*)、短序楠(*Machilus breviflora*)、密花树(*Rapanea neriifolia*)、桃叶石楠(*Photinia prunifolia*) | 115.36 | 489 | 19.2 | 81% | 黄壤 |

ravine rainforest (LA), a lowland monsoon evergreen broadleaf forest (MA) and an upland monsoon evergreen broadleaf forest (UA)

### 1.2　土壤样品采集

2011 年 7 月,在所选定的上述森林中,分别设置 5 个样地,样地面积为 20 m×20 m。在每个样地内, 挖取

3 个典型土壤剖面，按 0—15、15—30、30—45 cm 和 45—60 cm 划分土层，用 100 $cm^3$环刀分层取土，带回实验室测定各土层的土壤容重。之后，采用“S”形布设方法，在各个样地内布设 5 个点，除去枯枝落叶层后，用内径为 3cm 的土钻钻取土芯，同一样地按 0—15 cm、15—30 cm、30—45 cm 和 45—60 cm 土层进行同层混合，装入布袋，带回实验室保存。每个林型内各自取 20 个土壤样品，样品数总计 60 个。样品处理时，先剔除活体根系、石块等杂物，并取小样本测定土壤含水率。之后，将土壤样品分成两等份：一份置于-4 ℃冷藏，用于测定水溶性有机碳和微生物生物量碳；另一份于阴凉干燥通风处自然风干，取小样本进行研磨、过 2 mm 筛，测定 pH 值，另取小样本进行研磨、过 0.15 mm 筛，用于测定总有机碳、颗粒碳、易氧化性碳和惰性碳以及土壤理化性质。

### 1.3 测定与计算方法

基础理化性质测定：采用环刀法测定土壤容重，铝盒法测定土壤含水率，重铬酸钾容量法测定土壤有机碳全量，半微量凯氏法（$K_2SO_4$- $CuSO_4$- Se 蒸馏法）测定土壤全氮含量，电位法测定 pH 值，乙酸铵提取-火焰光度法测定速效钾含量[23]，扩散法测定碱解氮含量[24]。

土壤微生物生物量碳（MBC）：采用氯仿熏蒸-提取法[25]。即，称取新鲜土 20 g 分别放入 6 个烧杯中，其中一半（6 个平行中的 3 个）以 50 mL0.5 mol/L 硫酸钾浸提（震荡 0.5 h），浸提液立即处理测定。另一半熏蒸 24 h 取出放净氯仿气体后浸提（同时做空白）。准确吸取浸提液 5 mL 试管中，加入 5 mL 0.009mol/L 重铬酸钾溶液，加入少量沸石，于 160—170 ℃油浴锅中煮沸 10 min。冷却后全部转移至三角瓶中，加入 2 滴邻啡罗啉剂指示剂，用 0.02 mol/L 硫酸亚铁溶液滴定。

土壤水溶性有机碳（WSOC）：采用去离子水振荡浸提新鲜土壤样品[26]。即，称鲜土 20 g（同时测定土壤含水量），水土比为 2∶1，用蒸馏水浸提，在 25 ℃下振荡 0.5 h，再在高速离心机中（8000 转/min）离心 10 min 后，抽滤过 0.45 μm 滤膜，抽滤液直接在岛津 TOC-VcpH 有机碳分析仪上测定土壤水溶性有机碳。

土壤颗粒碳（POC）：参照 Cambardella & Elliott[27]所述方法。即，称取 20 g 风干土壤放入塑料瓶中，加入 50 mL 5 g/L 的六偏磷酸钠溶液，震荡 15 h（25 ℃，90 r/min），分散。分散溶液置于 0.053 mm 筛子上，用清水冲洗直至沥滤液澄清，筛上保留 0.053—2 mm 土壤即为土壤颗粒有机质。将土壤颗粒有机质在 50 ℃下烘干至恒重，称重，研磨粉碎过 0.25 mm 筛，按上述方法测定有机碳和全氮含量。

土壤易氧化态碳（ROC）：采用高锰酸钾氧化法[16,28]。即，取 3 份含有 15—30 mg 碳的土壤样品，装入 100 mL 离心管中，加 333 mmol/L 的高锰酸钾溶液 25 mL，密封瓶口，在 250 r/min 振荡 1 h。同时做空白样，振荡后的样品以 4000 r/min 离心 5 min，之后取上清液用去离子水按 1∶250 的液∶水比例稀释；稀释液在 565 nm 的分光光度计上比色，测定稀释样品的吸光率，由不加土壤的空白与土壤样品的吸光率之差，计算出高锰酸钾浓度的变化，并进而计算出氧化的碳量），其标准液的浓度范围必须包括 1 mg 碳，根据高锰酸钾的消耗量，即求出样品的 ROC。

土壤惰性碳（RC）：采用酸水解法[29-30]。即，称取 2 g 过 2 mm 筛的风干土样于消煮管中，然后加入 6 mol/L HCL 并在 115 ℃下消煮 16 h，样品冷却后用蒸馏水洗至中性，再在 55 ℃下烘干，研磨过 180 μm 筛，用重铬酸钾容量法-外加热法测得的有机碳即为惰性碳。

土壤碳库计算公式为 $Y_{库}(Mg/hm^2) = X_i \times BD_i \times th_i \times 10^{-1}$[5]

式中，$i$ 为土层，$X_i$ 为活性碳或惰性碳库组分的含量（g $kg^{-1}$），$BD_i$ 为土壤容重（Mg $m^{-3}$），$th_i$ 为土层厚度（cm）。土壤总碳库为所有土层中各组分碳库之和。

### 1.4 数据处理

所有数据经 Excel 软件处理后，用 SPSS11.5 软件进行统计分析，采用单因素方差分析（one-way ANOVA）和 Duncan 检验比较各参数间的差异，显著性水平与极显著性水平分别设定为 $P<0.05$ 和 $P<0.01$。土壤碳库与土壤理化性质指标的相关性采用 Pearson 相关系数表示。SigPlot10.0 制作所有图。

## 2　结果与分析

### 2.1　土壤基础理化性质

表 2 可见,土壤含水率与碱解氮含量均随海拔增加而下降,土壤全氮和速效钾含量为低地常绿阔叶林>沟谷雨林>山地常绿阔叶林,土壤 pH 值为山地常绿阔叶林>沟谷雨林>低地常绿阔叶林。C/N 比值以山地常绿阔叶林最大,沟谷雨林与低地常绿阔叶林之间无显著差异;在 30—45 cm 土层中,山地常绿阔叶林土壤 C/N 比值达 29.46,而低地常绿阔叶林和沟谷雨林只有 14.40 和 10.71。

### 2.2　土壤有机碳和总碳库变化

在 15—30 cm 土层中,不同海拔高度的森林土壤有机碳含量差异显著,低地常绿阔叶林最大,分别比沟谷雨林、山地常绿阔叶林高 16.34%、20.86%。在 30—45 cm 土层中,低地常绿阔叶林土壤有机碳含量最大,分别比沟谷雨林、山地常绿阔叶林高 13.61%、34.32%(图 1)。

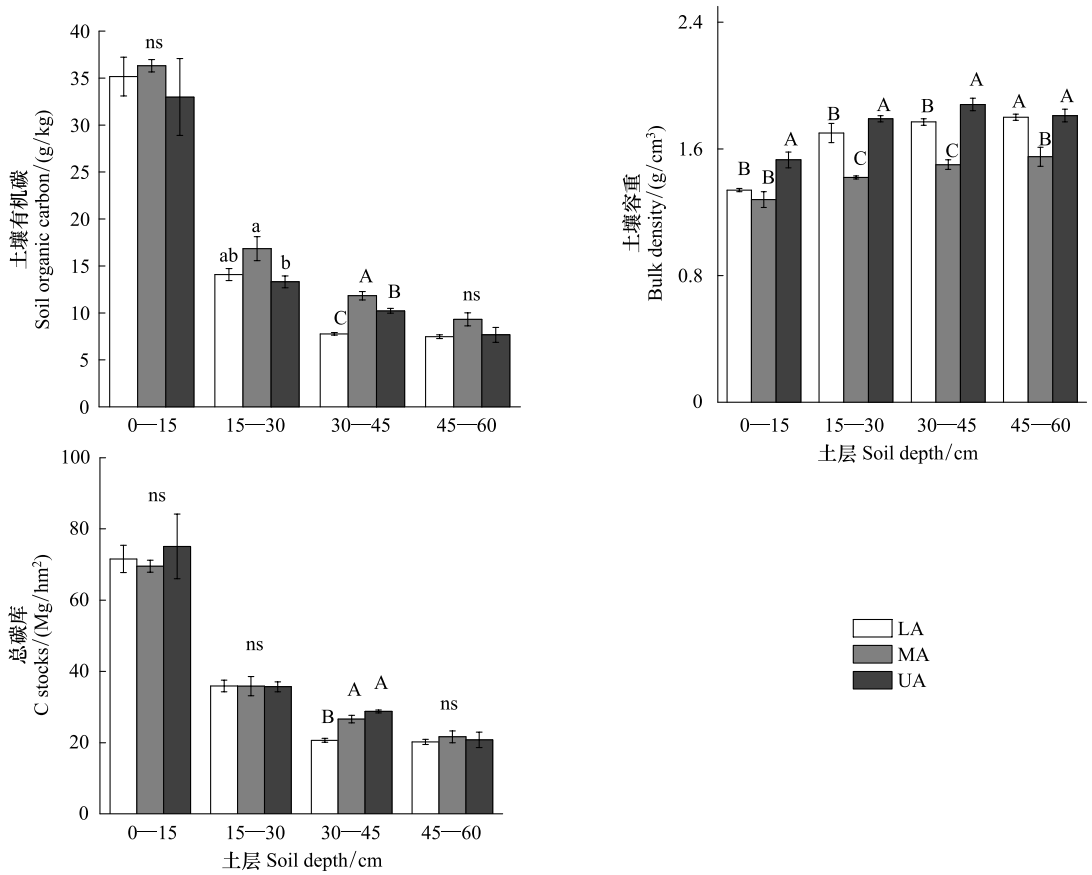


**图 1　海拔梯度上森林土壤有机碳、容重及碳库(平均值±标准误差)**

**Fig.1　Soil organic carbon content, bulk density and total carbon pools along a ravine rainforest (LA), a lowland monsoon evergreen broadleaf forest (MA) and an upland monsoon evergreen broadleaf forest (UA) (mean±SE)**

不同大小写字母表示同一土层不同林型间差异显著($p<0.05$; $p<0.01$),ns 表示无显著差异

在 0—15 cm 表土中,山地常绿阔叶林的土壤容重显著高于沟谷雨林、低地常绿阔叶林,分别为 1.53、1.34、1.28;在 15—30 cm 和 30—45 cm 土层中,3 种森林土壤容重差异显著,以山地常绿阔叶林最大,低地常绿阔叶林最小;在 45—60 cm 深层土壤中,仍然是低地常绿阔叶林土壤容重最小,其它 2 种森林土壤容重无显著差异(图 1)。

沟谷雨林、低地常绿阔叶林和山地常绿阔叶林土壤总碳储量分别为 20.64 Mg/hm$^2$、26.58 Mg/hm$^2$ 和 28.76 Mg/hm$^2$,表现为随海拔高度递增而增加。而且,仅仅在 30—45 cm 土层中,低地常绿阔叶林和山地常绿阔叶

林土壤总碳储量分别比沟谷雨林高 22.35%和 28.23%,其它土层不同海拔森林土壤的碳储量无显著差异(图 1)。

表 2 海拔梯度上森林土壤基础理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties along the altitudinal forests

| 土层/cm Soil depth | 林型 Forest type | 含水率/% Water content | pH | 全氮 TN/(g/kg) | 碱解氮 Hydrolysable-N/(mg/kg) | 速效钾 Available potassium/(mg/kg) | 碳氮比 C/N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0—15 | LA | 29.01±0.70A | 3.55±0.01B | 2.13±0.15A | 193.97±3.17A | 42.95±0.39A | 16.57±0.37A |
| | MA | 26.00±0.17B | 3.48±0.00C | 2.12±0.02AB | 175.95±3.14A | 48.85±3.21A | 17.17±0.42A |
| | UA | 20.04±1.03C | 3.67±0.03A | 1.60±0.18B | 147.72±15.61B | 34.49±2.80B | 20.76±1.96A |
| 15—30 | LA | 21.77±0.10A | 3.81±0.01B | 0.94±0.03B | 77.20±1.82B | 15.96±0.61B | 14.95±0.47B |
| | MA | 22.20±0.29A | 3.64±0.01C | 1.18±0.08A | 102.76±4.73A | 34.87±2.09A | 14.19±0.32B |
| | UA | 17.29±0.66B | 3.90±0.00A | 0.56±0.04C | 64.30±4.97B | 12.69±2.42B | 24.41±1.90A |
| 30—45 | LA | 20.35±0.11A | 3.84±0.01B | 0.73±0.04AB | 52.56±0.19A | 17.05±1.82B | 10.71±0.50B |
| | MA | 19.16±0.27B | 3.74±0.01C | 0.83±0.05A | 54.44±2.44A | 29.36±1.12A | 14.40±0.49B |
| | UA | 16.51±0.56C | 3.99±0.01A | 0.37±0.05B | 32.34±1.82B | 10.91±1.18C | 29.46±4.04A |
| 45—60 | LA | 21.17±0.20A | 3.87±0.01B | 0.70±0.02AB | 43.70±1.52A | 12.95±1.63B | 10.69±0.48B |
| | MA | 17.96±0.37B | 3.80±0.02C | 0.74±0.05A | 31.15±1.11B | 22.69±0.64A | 12.51±0.41B |
| | UA | 16.96±0.56B | 4.07±0.03A | 0.29±0.05B | 25.45±1.72C | 9.36±1.05B | 27.67±2.55A |

LA、MA 和 UA 分别指低海拔沟谷雨林、中间海拔低地常绿阔叶林和高海拔山地常绿阔叶林。同一土层中,不同大写字母表征不同森林间差异显著($P<0.05$)

### 2.3 土壤活性碳库大小及其占总碳库的百分比变化

如图 2 所示,在 0—15 cm 土层中,沟谷雨林和低地常绿阔叶林土壤微生物生物量碳库(0.53 和 0.48 Mg/hm$^2$)显著高于山地常绿阔叶林(0.37 Mg/hm$^2$),分别高出 30.2%和 22.9%。在 15—30 cm 土层中,海拔梯度上的 3 种森林土壤的微生物生物量碳库无显著差异。在 30—45 cm 土层中,沟谷雨林土壤微生物生物量碳库显著低于低地和山地常绿阔叶林,且后二者之间无显著差异。在 45—60 cm 深层土壤中,低地常绿阔叶林土壤微生物碳库最大(0.18 Mg/hm$^2$),显著高于沟谷雨林(0.06 Mg/hm$^2$)和山地常绿阔叶林(0.05 Mg/hm$^2$),分别高出 66.7%和 72.2%。

4 个土壤层中,不同海拔高度的森林土壤水溶性碳库和颗粒碳碳库无显著差异,土壤易氧化碳则仅在 0—15 cm 表层土壤中产生显著变化,且山地常绿阔叶林土壤易氧化碳库(21.31 Mg/hm$^2$)极显著地大于低地常绿阔叶林(12.82 Mg/hm$^2$)和沟谷雨林(12.03 Mg/hm$^2$),分别高出 44.35%和 39.84%。

如图 3 所示,不同海拔高度的森林土壤微生物碳库占总碳库的百分比仅在下层和深层土壤(30—45 cm 和 45—60 cm)中存在显著差异。在 30—45 cm 土层中,沟谷雨林土壤微生物碳库占总碳库的比(0.57%)显著低于低地常绿阔叶林(0.76%)和山地常绿阔叶林(0.77%);在 45—60 cm 土层中,低地常绿阔叶林(0.86%)显著高于沟谷雨林(0.30%)和山地常绿阔叶林(0.25%),分别高出 65.12%和 70.93%。

不同海拔的森林土壤颗粒碳占总碳库的百分比仅在 15—30 cm 土层存在显著差异,低地常绿阔叶林(38.39%)比沟谷雨林(31.40%)和山地常绿阔叶林(26.65%)分别高出 18.21%和 30.58%。土壤易氧化碳占总碳库的百分比仅在 0—15 cm 土层存在显著差异,山地常绿阔叶林(29.51%)比沟谷雨林(18.22%)和低地常绿阔叶林(17.18%)分别提高了 38.26%和 41.78%。

### 2.4 惰性碳库大小及百分比变化

如图 4 所示,0—15 cm 和 15—30 cm 土层中惰性碳库不随海拔高度的变化而发生显著改变。在 30—45 cm 土壤中,低地常绿阔叶林土壤惰性碳库为 12.26 Mg/hm$^2$,显著大于沟谷雨林和山地常绿阔叶林(5.63 Mg/hm$^2$和 5.96 Mg/hm$^2$),分别高出 54.1%和 51.4%。在 45—60 cm 土层中,仍然是低地常绿阔叶林土壤惰性碳库

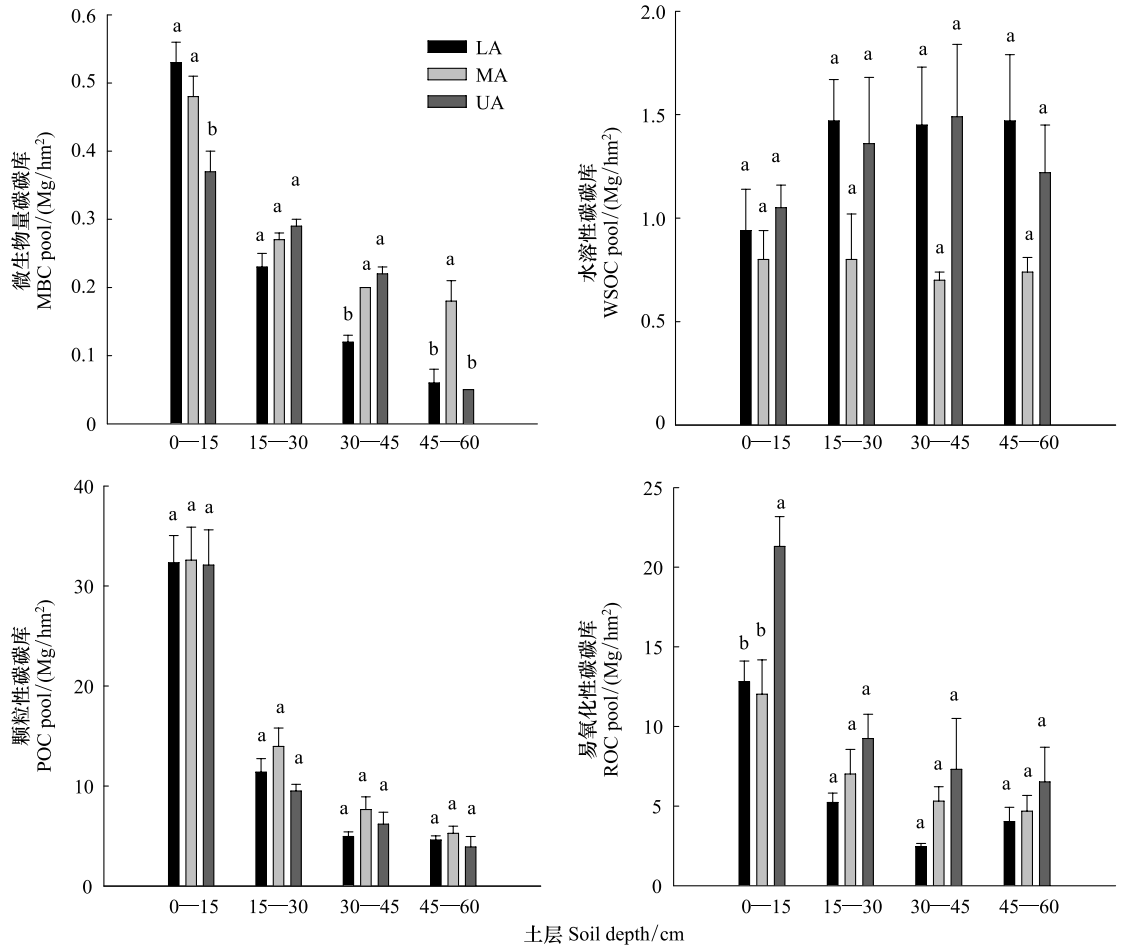


**图 2　海拔梯度上森林土壤活性碳库的变化(平均值±标准误差)**

**Fig.2　Dynamics of microbial biomass carbon (MBC), water-soluble organic carbon (WSOC), particulate organic carbon (POC), and readily oxidizable carbon (ROC) along the altitudinal forests**(mean±SE)

不同大小写字母表示同一土层不同林型间差异显著($P$<0.05)

最大(6.78 Mg/hm$^2$),分别比沟谷雨林和山地常绿阔叶林高 43.9%和 16.7%。可见,中海拔低地常绿阔叶林 30 cm 以下土层中具有最大的惰性碳库,山地常绿阔叶林次之,沟谷雨林最小。

不同海拔高度的森林土壤惰性碳库占总碳库的比值仅在 0—15 cm 土层中存在显著差异,表现为随海拔的增加而增加,山地常绿阔叶林比沟谷雨林和低地常绿阔叶林分别高出 15.55%和 9.19%。

### 2.5　土壤各碳库与土壤理化性质的关系

表 3 可见, 土壤总碳库、微生物碳库、颗粒碳库及惰性碳库均与土壤容重、pH 值成负相关,与土壤含水率、全氮、碱解氮、速效钾成正相关。水溶性碳库大小则与土壤容重、pH 值成正比,与速效钾成反比。易氧化性碳库仅与 pH 值成负相关,与土壤容重、含水率、全氮、碱解氮和速效钾均成正相关。

微生物碳库百分比仅与土壤容重成负相关,与其他理化性质无关。而水溶性碳库百分比仅与土壤容重和 pH 值成正相关,与其他理化性质指标均负相关。颗粒碳与惰性碳库百分比与土壤容重和 pH 值为负相关,与含水率、全氮、碱解氮、速效钾成正相关。易氧化性碳库百分比仅与土壤含水率成负相关,与其他指标均无关。

## 3　讨论

### 3.1　土壤总碳库及碳组成随海拔梯度的变化

本研究结果表明土壤总碳库在 30—45 cm 土层中随着海拔梯度的升高而显著增加,这与前人的研究结果

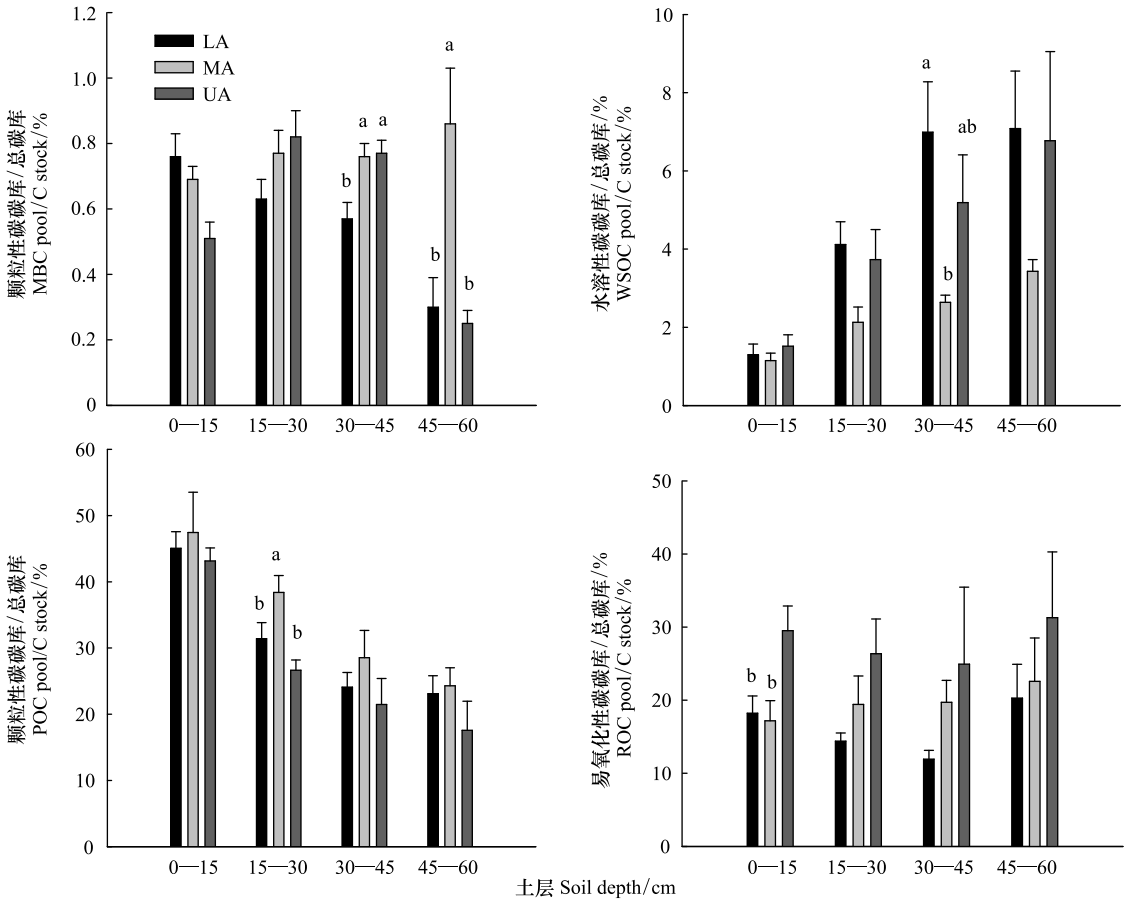


**图 3 海拔梯度上森林土壤活性碳库占总碳库的百分比的变化（平均值±标准误差）**

**Fig.3 The proportion of different active soil carbon pools to total soil carbon pool along the altitudinal forests(mean±SE)**

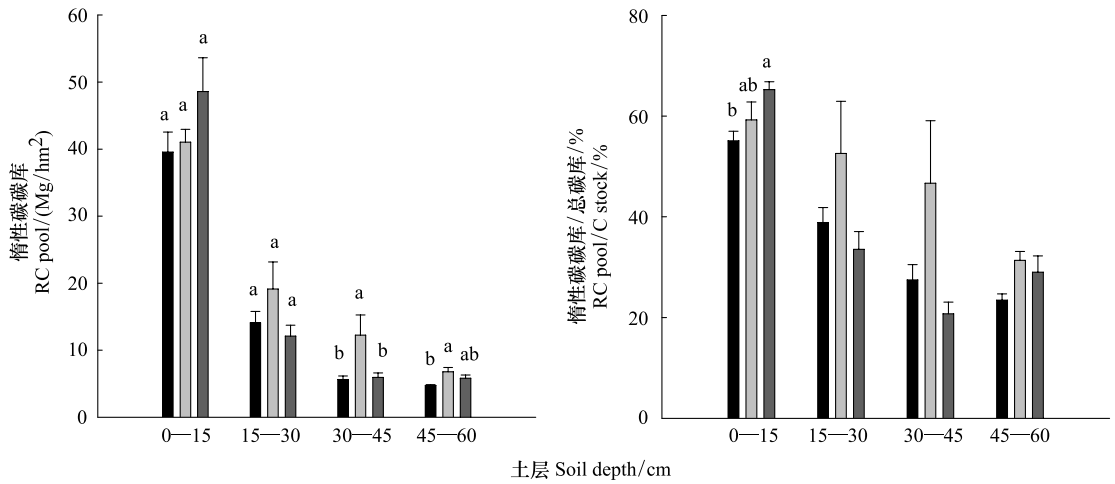


**图 4 海拔梯度上森林土壤惰性碳碳库及惰性碳库占总碳库百分比变化（平均值±标准误差）**

**Fig.4 The standing stock of recalcitrant carbon (RC) and the ratio of RC pool to total soil carbon pool along the altitudinal forests(mean ±SE)**

即随着海拔梯度的升高,土壤碳库变小[12]是不一致的,导致这一结果的原因主要有以下几个方面:1、本研究中低海拔和中间海拔森林凋落物产量比高海拔高约 2 倍(见表 1),高的凋落物输入量反而促进了土壤有机碳的周转和分解作用[31-32];2、低海拔和中间海拔森林土壤含水率均显著高于高海拔(见表 2),而土壤的含水率

与土壤微生物活动以及土壤呼吸作用密切相关,一般土壤含水率越高则土壤微生物对有机碳的分解作用越强,从而降低这两个森林碳库的累积[33-34];3、温度对碳库积累也有一定的研究,有研究表明温度越低碳库越大,而在本研究中高海拔梯度森林温度相对较低,这促进了该森林土壤中碳库的积累[35];4、在本研究中虽然低海拔和高海森林的地上生物量以及地表凋落物产量均比高海拔森林大,但高海拔山地林中由于树种的不同可能带来较大的地下生物量输入,而地下细根生物量的增加一方面可增加了深层土中有机物质的输入,另一方面根系分泌物的增加促进了细根与土壤颗粒的结合,加强了对该森林中土壤团聚体内有机碳的物理保护性作用[36-37]。综上,产生了本研究中高海拔森林的深层土壤(30—45 cm)中总碳库含量最大。

**表 3　森林土壤有机碳库组分与土壤理化性质的相关性**

**Table 3　Coefficients of Pearson's correlations between the components of soil organic carbon pools and soil physicochemical characteristics of the three forests**

| 测试项目 Measure items | 容重 Bulk density | 含水率 Water content | pH | TN | 碱解氮 Hydrolysable-N | 速效钾 Available potassium |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 总碳库 Carbon(C) stock | −0.608** | 0.653** | −0.730** | 0.875** | 0.905** | 0.695** |
| MBC 碳库 MBC pool | −0.667** | 0.591** | −0.751** | 0.811** | 0.853** | 0.671** |
| WSOC 碳库 WSOC pool | 0.497** | −0.107 | 0.324* | −0.235 | −0.230 | −0.333** |
| POC 碳库 POC pool | −0.700** | 0.705** | −0.779** | 0.898** | 0.920** | 0.749** |
| ROC 碳库 ROC pool | 0.342** | 0.263** | −0.399** | 0.527** | 0.590** | 0.437** |
| RC 碳库 RC pool | −0.675** | 0.678** | −0.762** | 0.874** | 0.893** | 0.739** |
| MBC 碳库占总碳库百分比 MBC pool/ C stock/% | −0.302* | −0.026 | −0.248 | 0.114 | 0.116 | 0.154 |
| WSOC 碳库占总碳库百分比 WSOC pool/ C stock/% | 0.635** | −0.381** | 0.569** | −0.560** | −0.560** | −0.554** |
| POC 碳库占总碳库百分比 POC pool/ C stock/% | −0.734** | 0.678** | −0.762** | 0.781** | 0.787** | 0.698** |
| ROC 碳库占总碳库百分比 ROC pool/ C stock/% | 0.108 | −0.272* | 0.221 | −0.154 | −0.130 | −0.104 |
| RC 碳库占总碳库百分比 RC pool/ C stock/% | −0.683** | 0.482** | −0.677** | 0.671** | 0.675** | 0.667** |

MBC: 微生物碳库 microbial biomass carbon;WSOC: 水溶性碳库 water-soluble organic carbon;POC: 颗粒碳 particulate organic carbon;ROC: 易氧化性碳库 readily oxidizable carbon;RC: 惰性碳库 recalcitrant carbon; * $P<0.05$; ** $P<0.01$

3 个森林的土壤微生物碳库在 4 个土层中基本上都是中间海拔的储量最大,这与中间海拔梯度森林中的湿度大以及凋落物输入量高是密不可分的。土壤易氧化性碳(ROC)碳库及其占总碳库的百分比均是高海拔梯度最大,这与徐侠等[38]的研究结果一致,即易氧化碳含量随海拔上升而增加,导致这一结果的主要原因可能是:(1)ROC 和 TOC 显著相关($P<0.05$), 活性碳含量在很大程度上取决于土壤总有机碳贮量[39],沿海拔梯度总有机碳库的增加导致高海拔梯度森林中 ROC 含量增加;(2)土壤活性有机碳作为有机质的敏感性指标,其在经营管理或其他土壤干扰的影响下会有较大的波动[40],因此,本研究中低海拔梯度森林土壤中受到较大的人为干扰导致了 ROC 含量的降低,而相反高海拔森林则积累了更多的 ROC;(3)研究表明,ROC 含量与沿海拔梯度对应的土壤温度呈显著的负相关性($P<0.05$),温度影响 ROC 的含量,较低的温度(高海拔)有利于土壤有机碳的积累。惰性碳(RC)碳库仅在深层土壤中存在显著性差异,引起高海拔森林土壤中惰性碳含量及比值增加的原因与高海拔梯度森林的总碳库储量大(图 1)、温度低以及 C/N 比大(表 2)这三个因素是密切相关的,高海拔梯度森林土壤大的 C/N 比降低了微生物的降解作用,从而促进了惰性碳的积累,但具体原因有待进一步研究和探讨。

此外,本研究中三个森林的 5 个碳组成部分占总碳的百分比之和大于 100%,这是因为本研究中的 5 个碳组分存在一定的交叉,相互间具有一定区别和联系,区别主要体现在获取方法上,如微生物生物量量碳是采用

氯仿熏蒸-提取法获得、水溶性碳是采用蒸馏水浸提获得、易氧化性碳是采用高锰酸钾提取获得、惰性碳是用强酸水解获得,而颗粒碳却是采用物理方法筛选得到的,其并没有受到任何化学提取作用的影响,因此颗粒碳必然会包括一些其它碳组分如微生物量碳、易氧化性碳等。因此,这是导致上述实验结果的一个重要原因。此外,本研究结果表明,3 个森林土壤中所有碳组成部分占总碳库的百分比大小顺序是:惰性碳(变化范围:29.01%—65.26%)>颗粒碳(变化范围:17.57%—47.44%)>易氧化性碳(变化范围:11.95%—31.30%)>水溶性碳(变化范围:1.15%—7.08%)>微生物碳(变化范围:0.25%—0.86%),其中惰性碳、颗粒碳和易氧化性碳是这 3 个森林土壤有机碳的主要组成部分,而水溶性碳和微生物碳占总碳库的百分比远远小于惰性碳、颗粒碳和易氧化性碳。同时在本研究的 3 个海拔梯度的森林土壤中惰性碳和易氧化性碳占总碳库的百分比均发生较大的改变,都是高海拔森林土壤的显著大于中间海拔和低海拔,说明在本研究中海拔梯度的变化主要改变了土壤惰性碳和易氧化性碳这两大碳库组成部分。

### 3.2 土壤理化性质对碳组成变化的影响

在本研究中,土壤理化性质(容重、含水率、pH 值、全氮、碱解氮、速效钾等)与不同海拔高度的森林土壤总碳库、碳库组成及碳库组成百分比呈显著的相关性,说明土壤理化性质的改变也是引起不同海拔梯度森林土壤碳库组成变化的一个重要因素。其中本研究中土壤碳库组成与土壤氮之间的极显著相关性研究结果与沈宏等[41]、徐阳春等[42]的研究结果一致,这是因为土壤有机质的氮含量会影响到微生物对有机质分解、利用速度。总体上,低地常绿阔叶林土壤全氮含量最大(表 2),表明在一定范围内,含氮量高的有机质易被微生物分解,迁移、转化速度快,从而对土壤中有效碳和惰性碳的含量产生一定影响。

**参考文献(References):**


[1] Lal R, Kimble J M, Eswaran H, Stewart B A. Global Climate Change and Pedogenic Carbonates. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999: 15-25.

[2] Matos E S, Freese D, Ślązak A, Bachmann U, Veste M, Hüttl R F. Organic-carbon and nitrogen stocks and organic-carbon fractions in soil under mixed pine and oak forest stands of different ages in NE Germany. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 173(5): 654-661.

[3] Six J, Jastrow J D. Organic matter turnover // Encyclopedia of Soil Science. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002: 936-942.

[4] Baker D F. Reassessing carbon sinks. Science, 2007, 316(5832): 1708-1709.

[5] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 151-163.

[6] Eswaran H, Van Den B E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(1): 192-194.

[7] Kimble J M, Stewart B A. Global Climate Change and Tropical Ecosystems. New York: CRC Press Inc., 1999: 71-96.

[8] Körner C. The use of 'altitude' in ecological research. Trends in Ecology & Evolution, 2007, 22(11): 569-574.

[9] Zhu B, Wang X P, Fang J Y, Piao S L, Shen H H, Zhao S P, Peng C H. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China. Journal of Plant Research, 2010, 123(4): 439-452.

[10] Zhang M, Zhang X K, Liang W J, Jiang Y, Dai G H, Wang X G, Han S J. Distribution of soil organic carbon fractions along the altitudinal gradient in Changbai Mountain, China. Pedosphere, 2011, 21(5): 615-620.

[11] 柯娴氡, 张璐, 苏志尧. 粤北亚热带山地森林土壤有机碳沿海拔梯度的变化. 生态与农村环境学报, 2012, 28(2): 151-156.

[12] 胡宗达, 刘世荣, 史作民, 刘兴良, 何飞. 不同海拔梯度川滇高山栎林土壤颗粒组成及养分含量. 林业科学, 2012, 48(3): 1-6.

[13] Sheikh M A, Kumar M, Bussmann R W. Altitudinal variation in soil organic carbon stock in coniferous subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. Carbon Balance and Management, 2009, 4(1): 1-6.

[14] 向成华, 栾军伟, 骆宗诗, 宫渊波. 川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布. 生态学报, 2010, 30(4): 1025-1034.

[15] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5): 1173-1179.

[16] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459-1466.

[17] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, Yin Y F, Gao R, Lin C F. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China. Plant and Soil, 2009, 323(1/2): 153-162.

[18] Chen X M, Liu J X, Deng Q, Yan J H, Zhang D Q. Effects of elevated $CO_2$ and nitrogen addition on soil organic carbon fractions in a subtropical forest. Plant and Soil, 2012, 357(1/2): 25-34.

[19] Knorr W, Prentice I C, House J I, Holland E A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. Nature, 2005, 433(7023): 298-301.

[20] 彭闪江, 黄忠良, 徐国良, 欧阳学军, 张池. 生境异质性对鼎湖山植物群落多样性的影响. 广西植物, 2003, 23(5): 391-398.

[21] 温达志, 魏平, 张倩媚, 孔国辉. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林生物量的研究. 植物生态学报, 1993, 23(增刊): 11-21.

[22] Zhou G Y, Guan L L, Wei X H, Zhang D Q, Zhang Q M, Yan J H, Wen D Z, Liu J X, Liu S G, Huang Z L, Kong G H, Mo J M, Yu Q F. Litterfall production along successional and altitudinal gradients of subtropical monsoon evergreen broadleaved forests in Guangdong, China. Plant Ecology, 2007, 188(1): 77-89.

[23] 鲁如坤. 土壤农化分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1996.

[24] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 56-58.

[25] Joergensen R G, Brookes P C. Ninhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0. 5 m $K_2SO_4$ soil extracts. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1023-1027.

[26] 李永夫, 姜培坤, 刘娟, 王旭东, 吴家森, 叶耿平, 周国模. 施肥对毛竹林土壤水溶性有机碳氮与温室气体排放的影响. 林业科学, 2010, 46(12): 165-170.

[27] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783.

[28] 沈宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响. 土壤学报, 2000, 37(2): 166-173.

[29] Leavitt S W, Follett R F, Paul E A. Estimation of slow- and fast- cycling soil organic carbon pools from 6 N HCl hydrolysis. Radiocarbon, 1996, 38(2): 231-239.

[30] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究. 水土保持学报, 2005, 19(3): 24-28.

[31] Taneva L, Pippen J S, Schlesinger W H, Gonzalea-Meler M A. The turnover of carbon pools contributing to soil $CO_2$ and soil respiration in a temperate forest exposed to elevated $CO_2$ concentration. Global Change Biology, 2006, 12(6): 983-994.

[32] Fontaine S, Bardoux G, Abbadie L, Mariotti A. Carbon input to soil may decrease soil carbon content. Ecology Letters, 2004, 7(4): 314-320.

[33] Liu J X, Zhang D Q, Zhou G Y, Faivre-Vuillin B, Deng Q, Wang C L. $CO_2$ enrichment increases nutrient leaching from model forest ecosystems in subtropical China. Biogeosciences, 2008, 5(6): 1783-1795.

[34] Deng Q, Zhou G Y, Liu J X, Duan H L, Zhang D Q. Responses of soil respiration to elevated carbon dioxide and nitrogen addition in young subtropical forest ecosystems in China. Biogeosciences, 2010, 7(1): 315-328.

[35] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.

[36] Rasse D P, Rumpel C, Dignac M F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. Plant and Soil, 2005, 269(1/2): 341-356.

[37] Wang H, Liu S R, Mo J M, Wang J X, Makeschin F, Wolff M. Soil organic carbon stock and chemical composition in four plantations of indigenous tree pecies in subtropical China. Ecology Research, 2010, 25(6): 1071-1079.

[38] 徐侠, 王丰, 栾以玲, 汪家社, 方燕鸿, 阮宏华. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1115-1121.

[39] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(4): 471-479.

[40] McLauchlan K K, Hobbie S E. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(5): 1616-1625.

[41] 沈宏, 曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素有效率的影响. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(1): 1-5.

[42] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96.