

华南典型人工林土壤有机碳库及其稳定性特征研究

刘瑾^{1,3}, 孙毓鑫^{2,3}, 王法明^{1,3}, 邹碧¹, 李志安^{1*}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 研究了华南地区 4 种 25 年林龄的典型人工林土壤有机碳库及其稳定性特征。测定了林内 0~10 cm 和 10~20 cm 层土壤的有机碳(Total organic carbon, TOC)含量、易分解碳库/稳定性碳库大小以及土壤微生物生物量碳。结果表明, 4 种林型土壤 TOC 含量为: 马占相思林 > 大叶相思林 > 湿地松林 > 荷木林, 其中豆科人工林(马占相思和大叶相思林)的 TOC 含量显著高于非豆科人工林(湿地松和荷木林)。在表土层(0~10 cm), 荷木林易分解碳库最大(7.80 mg g⁻¹), 易分解性碳潜在周转时间最短(49 d), 马占相思林易分解碳库最小(2.14 mg g⁻¹), 占总碳量也最小(8.63%), 说明马占相思林土壤有机碳库比其它人工林具有更好的稳定性。4 种人工林表土层土壤微生物量碳含量为马占相思林 > 湿地松林 > 大叶相思林 > 荷木林, 马占相思林显著高于其它 3 种人工林, 表土层微生物量碳含量格局与土壤有机碳含量相似, 较高的微生物量有利于更多的枯枝落叶转化为土壤有机碳。在亚表土层(10~20 cm), 大叶相思林土壤微生物量碳最大, 马占相思林最小, 与表土层的格局相反, 但亚表土层微生物碳总含量并不高。因而, 人工林土壤有机碳积累水平与土壤有机碳的稳定性及表层土壤微生物量有关。

关键词: 人工林; 土壤有机碳; 易分解有机碳库; 华南

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3396(2010)06-0607-06

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.06.003

Carbon Stock and TOC Stability in Soils of Four Typical Plantations in South China

LIU Jin^{1,2}, SUN Yu-xin^{2,3}, WANG Fa-ming^{1,2}, ZOU Bi¹, LI Zhi-an^{1*}

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The carbon stock and total organic carbon (TOC) stability in soils of four typical plantations at 25-year-old in South China were investigated. The TOC content, labile carbon pool and soil microbial carbon in soil depth of 0~10 cm and 10~20 cm were determined. The results showed that soil TOC contents were in order as *Acacia mangium* > *Acacia auriculaeformis* > *Pinus ellettii* > *Schima superba* forest. Legume plantations (*A. mangium* and *A. auriculaeformis*) had markedly higher TOC content than non-legumes plantations (*P. ellettii* and *S. superba*). The TOC contents in two soil layers of *A. mangium* plantation were twice as high as those of *S. superba* plantation. *S. superba* plantation had the highest labile carbon pool (7.80 mg g⁻¹) and the shortest turnover time (49 d). On the contrast, *A. mangium* plantation had the lowest labile carbon pool (2.14 mg g⁻¹) and C_{lab}/TOC (8.63%). *A. mangium* plantation had more stable TOC than other 3 plantations. The microbial carbon contents in surface soil layer (0~10 cm) were in order as *A. mangium* plantation > *P. ellettii* plantation > *A. auriculaeformis* plantation > *S. superba* plantation. It suggested more microbes favored transformation of litter into soil organic matter. At the subsoil layer (10~20 cm), soil microbial carbon in *A. auriculaeformis* plantation was significantly

收稿日期: 2010-03-25 接受日期: 2010-05-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(30870442); 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421101); 国家自然科学基金重点项目子课题(30630015)资助

作者简介: 刘瑾, 女, 1986 年 5 月生, 研究方向为土壤生态学, email: bjfulj0522@163.com

* 通讯作者 Corresponding author, email: lizan@scbg.ac.cn

higher than those in others forest types, though it was very low in this layer. *A. mangium* plantation had the lowest microbial carbon content. It suggested that soil TOC accumulation in plantations was closely related to stability of organic matter and quantity of soil microbes.

Key words: Plantation; Soil organic carbon; Labile carbon pool; South China

利用森林植被,特别是被称为“京都森林”的新造人工林固定 CO₂ 是减缓全球变暖的最重要手段之一^[1]。在陆地生态系统中,有 62% ~ 78% 的碳蓄存于森林生态系统中,其中 70% 又蓄存于森林土壤中^[2],因而森林土壤是陆地上最为重要的碳汇,而这种碳汇的大小及潜力的实现与森林类型密切相关^[3]。过去 20 多年,广东省大面积种植的人工林已成为重要碳汇。人工林固持大气中 CO₂ 通常被认为是缘于地上生物量积累的贡献^[4],事实上,土壤固碳有着同样重要的贡献。华南地区大面积人工林土壤有机碳量已从造林初期的暂时性下降转变为大幅度上升^[5],然而,不同人工林土壤有机碳的特征有很大的区别,表现在有机碳积累总量和土壤中固持的耐久性不同。那些形成较多不易分解有机碳的人工林,使更多的碳固持于土壤中;有些有机碳进入深层土体,使碳固持时间更长,一般 20 cm 以下没有受到扰动的土壤,可以使有机碳持留百年之久^[6-7]。近年来,广东省进行大规模的生态公益林改造,以期优化森林结构,但由于缺乏对森林土壤碳固持机理的了解,使得大面积的人工林改造过程中并没有考虑强化土壤碳汇功能的因素。本文以广东常见的马占相思(*Acaia mangium*)、大叶相思(*Acacia auriculaeformis*)、荷木(*Schima superba*)和湿地松(*Pinus elliottii*) 4 种人工林为对象,研究其土壤有机碳库的大小及其稳定性特征,为当前我国碳汇林建设提供科学依据。

1 研究地概况

研究区设在中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站(简称鹤山站),位于广东省鹤山市(112°54'E, 22°14'N),多为低丘地势,最高峰 98 m。属南亚热带湿润季风气候,年均温 21.7℃,最热月均温 29.2℃,最冷月均温 12.6℃,年均太阳辐射量为 4354.7 MJ m⁻²a⁻¹,年均降雨量为 1638.8 mm。丘陵地土壤为赤红壤,呈酸性。在造林前,该地区为退化荒坡地,几乎无乔木植物,只有稀灌丛草地覆盖。1984 年起,鹤山站以集水区为单元建立了 8 个植被类型的人工林,包括针叶林、乡土林、豆科混交

林、林果草鱼和林果苗复合生态系统等^[8]。建站以来,这些人工林一直处于保护状态而自然生长。

2 材料和方法

材料 分别在每种人工林内随机选取 8 个点,在每个采样点处用土钻分别采集 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 层土壤,同层土壤 8 个采样点混合均匀为 1 个样,即每种林型不同土层各 1 个混合样,4 种林型共 8 个样品,除去沙石、植物残体、根系后过 2 mm 筛,取部分新鲜土壤用于土壤有机碳库和土壤微生物生物量碳的测定,剩余土壤自然风干,供土壤理化性质的分析。

土壤易分解性碳库的测定 采用熏蒸培养法测定^[9]。分别称取上述每种混合样各 6 份,每份 30 g,3 份熏蒸,另 3 份不熏蒸作对照,即每个处理分别设置 3 个重复。每份土壤接种 1 g 原土壤,置于 1 L 的带盖广口瓶中,加入 1 mL 水(保持土壤湿度为 40% ~ 50%),同时放入 1 个容积为 50 mL 的小烧杯(内盛 20 mL 1 mol/L 的 NaOH 溶液),密封广口瓶,在光照培养箱内 25℃ 培养 10 d,同时设置 3 个未装土壤的广口瓶作为空白对照。培养 10 d 后,取出碱液,加入过量的 1 mol/L BaCl₂ 溶液,以酚酞为指示剂,用 1 mol/L HCl 溶液滴定。采用相同的步骤对土壤熏蒸培养 5 ~ 8 次,每次熏蒸培养后都加 1 g 原土壤接种微生物。

第 i 次培养释放的 CO₂ 为: $C_i = [(A_i - V_i)N_iE - Q_i]/w$, 其中 A_i 为空白 NaOH 滴定体积; V_i 为熏蒸处理 NaOH 滴定体积; N_i 为酸当量浓度; $E = 6$, 为碳当量; w 为土壤质量; Q_i 是修正系数,用于校正接种土壤增加的碳的影响, $Q_i = C'/(r-1) + \sum [C_{t-1}/(r+1)]$, 其中 $t = 1, 2, \dots, n$; C' 是对照前 10 d 释放的 CO₂ 量; r 是培养土壤与接种土壤的重量比; 当 $t = 1$ 时, $C_{t-1} = 0$ 。熏蒸土壤累计 CO₂ 释放量 $M_i (t = 1, 2, \dots, n)$ 为: $M_i = C_{lab}(1 - e^{-kt})$, 其中 C_{lab} 为土壤易分解碳库的估计值; k 是潜在周转率,潜在周转时间(d)为 k 的倒数乘 10(每次培养时间为 10 d)。根据 5 ~ 8 次测定值,利用回归方法计算上述各参数。

土壤微生物生物量碳分析 用氯仿熏蒸法

提取^[10],全碳分析仪(Shimadzu TOC-VCPH)测定。土壤容重、pH 值、铵态氮、硝态氮、有机碳、全氮的分析方法主要依据中国生态系统研究网络标准^[11]。土壤容重采用环刀法测定;pH 值用土水 1: 2.5 提取,pH 计测定;铵态氮和硝态氮用 KCl 溶液提取,流动注射分析仪(QC8000, 美国 LACHAT 公司)测定;有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮经浓硫酸消煮后用全自动定氮仪(K-06B, 上海晟声公司)测定。

所有数据用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件进行统计分析。以土层和林型作为因子进行两因素方差分析,不同土层土壤有机碳库及易分解性碳库之间的显著性差异以 $P < 0.05$ 表示。

3 结果和讨论

3.1 土壤酸度与氮含量特征

碳周转过程与土壤酸度及氮含量密切相关^[12-14]。4 种人工林土壤的 pH 值都在 4.0 左右,马占相思林和荷木林表土层(0 ~ 10 cm)显著低于大叶相思林和湿地松林($P < 0.05$),亚表土层(10 ~ 20 cm)接近(表 1),说明植被对土壤酸度的影响主要体现在表土层,主要可能是地表凋落物作用的结果^[15-16]。不同林型土壤氮含量存在显著差异,具有固氮能力的马占相思林与大叶相思林全氮含量显著高于非豆科树种(湿地松和荷木林)($P < 0.05$),其中马占相思林表土层最高(2.17 mg g^{-1}),为非豆科树种的 2 倍以上。亚表土层全氮含量与表土层的格局相似。不同人工林的土壤氮形态特征也不同,非豆科人工林土壤铵态氮含量低于豆科人工林,表土层尤为明显。相反,硝态氮含量则是非豆科树种

高于豆科树种,表土层的差别也最大。氮形态特征与人工林早期的格局不同^[17]。

3.2 不同林型土壤有机碳含量

土壤有机碳(TOC)反映了输入土壤的生物残体等有机物质与土壤微生物分解的有机物质之间的得失平衡^[18]。从图 1 可见,4 种林型表土层(0 ~ 10 cm)有机碳含量为 $11.4 \sim 24.79 \text{ mg g}^{-1}$,亚表土层(10 ~ 20 cm)为 $7.63 \sim 13.93 \text{ mg g}^{-1}$,表层极显著高于亚表层($P < 0.01$),2 个土层的 TOC 含量相差接近 1 倍,显然在华南地区高温多湿的气候条件下,即使深度变化不大,土壤有机碳含量也有显著差异。在同一土层,4 种林型的土壤 TOC 含量也有显著差异($P < 0.05$),依次为:马占相思林 > 大叶相思林 > 湿地松林 > 荷木林,其中,马占相思林的 TOC 含量最大(表土层和亚表土层分别为 24.79 mg g^{-1} 和 13.93 mg g^{-1}),约为荷木林相应土层的 2 倍(分别为 11.4 mg g^{-1} 和 7.63 mg g^{-1})。另外,豆科人工林的土壤有机碳含量显著高于非豆科人工林,其格局与氮含量是一致的。林型间有机碳含量差异主要源于输入地表的凋落物数量与质量的不同^[19],Zou 等^[20]的研究表明,鹤山站人工林凋落物总量为马占相思林 > 大叶相思林 > 湿地松林 > 荷木林,与本研究 TOC 含量变化完全一致,由此可见,土壤有机碳含量高低可能由地表凋落物输入量的大小所决定。

3.3 不同林型土壤易分解性碳库及潜在周转时间

土壤易分解性碳库指可供微生物生长繁殖所利用的可降解性有机碳,同时具备化学降解性和物理可触及性^[9]。由表 2 可知,同一植被类型,表土

表 1 4 种人工林不同深度土壤酸度与氮含量
Table 1 Soil acidity and total nitrogen content of different plantations

土层 Soil depth (cm)	林型 Plantation	pH	全氮 Total nitrogen (mg g ⁻¹)	NH ₃ -N (mg kg ⁻¹)	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)
0 ~ 10	荷木 <i>S. superba</i>	3.99 ± 0.01b	0.61 ± 0.06c	4.76 ± 0.21b	8.40 ± 0.33a
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	4.09 ± 0.00a	0.66 ± 0.02c	4.25 ± 0.33b	9.00 ± 1.10a
	马占相思 <i>A. mangium</i>	3.84 ± 0.01c	2.17 ± 0.08a	7.87 ± 0.35a	5.78 ± 0.41b
	大叶相思 <i>A. auriculæformis</i>	4.08 ± 0.00a	1.04 ± 0.11b	6.58 ± 0.32a	6.02 ± 0.17b
10 ~ 20	荷木 <i>S. superba</i>	4.08 ± 0.00A	0.43 ± 0.01C	3.09 ± 0.31B	4.73 ± 0.50A
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	4.06 ± 0.00B	0.44 ± 0.01C	3.27 ± 0.22B	5.78 ± 0.41A
	马占相思 <i>A. mangium</i>	4.01 ± 0.01C	0.88 ± 0.10A	3.89 ± 0.36A	4.70 ± 0.33B
	大叶相思 <i>A. auriculæformis</i>	4.10 ± 0.01A	0.71 ± 0.09B	4.75 ± 0.18A	3.54 ± 0.34B

小、大写字母分别代表 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层林型之间的显著性差异。Small and capital letters present significant difference among plantations at 0 ~ 10 cm and 10 ~ 20 cm soil depth, respectively.

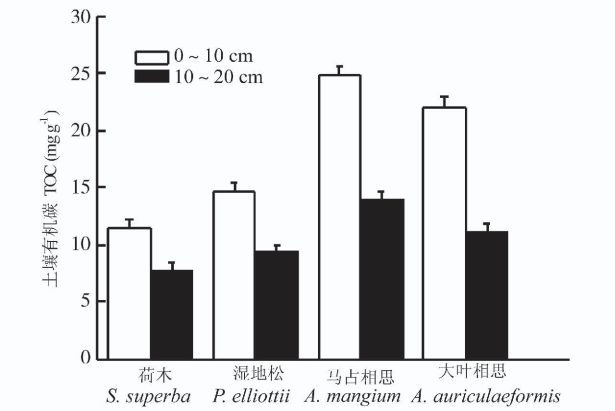


图 1 鹤山不同植被类型土壤有机碳含量

Fig. 1 TOC content of soil of different plantations in Heshan

层(0~10 cm)易分解性有机碳库(C_{lab})均高于亚表土层(10~20 cm),而表土层潜在周转时间则均低于亚表土层。其中,荷木林土壤的差异最为明显,表土层和亚表土层的 C_{lab} 值从 7.80 mg g^{-1} 下降到 2.09 mg g^{-1} ,下降了 73.2%,而易分解性有机碳的潜在周转时间从 49.02 d 增加到 104.17 d,增长约 2

倍, C_{lab}/TOC 值也从 68.46% 下降到 27.38%,这表明荷木林 0~10 cm 层土壤有机质极易分解,而 10~20 cm 层已基本趋于稳定。从易分解碳库的周转时间看,随着深度的增加,有机碳的稳定性增加。

4 种林型的同一土层,以荷木林的土壤易分解碳库最大,马占相思林最小。荷木林土壤易分解性碳库的潜在周转时间最短,表土层只有 49 d,不足其它人工林的一半。湿地松土壤易分解性碳库潜在周转时间最长,表土层和亚表土层分别为 204.08 d 和 227.27 d。马占相思林土壤易分解性碳库的潜在周转时间虽低于湿地松和大叶相思,但两个土层基本一致(分别为 106.38 d 和 103.09 d)。马占相思林土壤具有最小的 C_{lab} 值(分别为 2.14 mg g^{-1} 和 1.51 mg g^{-1})和 C_{lab}/TOC 值(分别为 8.63% 和 10.83%),表明在马占相思林土壤有机碳中,易分解碳比例很小,比其它人工林的土壤有机碳库具有更好的稳定性。

表 2 不同植被类型土壤易分解性碳库大小和潜在周转时间

Table 2 Pool sizes and potential turnover time of soil labile organic C in different plantations

土层 Soil depth (cm)	林型 Plantation	C_{lab} (mg g^{-1})	周转率 Turnover rate	周转时间 Turnover days	C_{lab}/TOC (%)
0~10	荷木 <i>S. superba</i>	7.80	0.20	49.02	68.46
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	2.69	0.05	204.08	18.40
	马占相思 <i>A. mangium</i>	2.14	0.09	106.38	8.63
	大叶相思 <i>A. auriculaeformis</i>	4.08	0.06	178.57	18.54
10~20	荷木 <i>S. superba</i>	2.09	0.10	104.17	27.38
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	1.76	0.04	227.27	18.80
	马占相思 <i>A. mangium</i>	1.51	0.10	103.09	10.83
	大叶相思 <i>A. auriculaeformis</i>	2.66	0.05	200.00	23.94

3.4 土壤微生物碳 (C_{mic})

土壤微生物碳常用来衡量土壤易分解性有机碳库的大小^[9]。4 种人工林土壤微生物碳在表土层(0~10 cm)和亚表土层(10~20 cm)的含量分别为 $0.31\sim0.57\text{ mg g}^{-1}$ 和 $0.16\sim0.33\text{ mg g}^{-1}$,表土层显著高于亚表土层($P<0.05$)(图 2)。表土层,4 种林型土壤微生物碳含量依次为马占相思林>大叶相思林>湿地松林>荷木林,其中马占相思林极显著高于其它 3 种林型($P<0.01$),后 3 种人工林之间无显著差异。亚表土层,大叶相思林的土壤微生物碳最大,其次为湿地松土壤,荷木林和马占相思林相对较小。

土壤微生物碳(C_{mic})与土壤有机碳(TOC)的比值(C_{mic}/TOC)是衡量土壤有机碳积累或损失的重要

参数^[21-22]。鼎湖山 400 年的自然林是成熟的顶级群落,其碳循环已基本达到了平衡状态, C_{mic}/TOC 为 1.95%^[23],同一地带 C_{mic}/TOC 高于此值则被认为是碳的积累阶段。本研究中 4 种林型在表土层(0~10 cm)的土壤 C_{mic}/TOC 为 1.76%~2.72%,均处于碳积累阶段,这与 Zhou 等^[24]的研究结果一致,其中,荷木和湿地松土壤碳积累的强度较为明显。在亚表土层(10~20 cm),除马占相思外,荷木、湿地松和大叶相思土壤也均处于碳积累阶段,其中大叶相思土壤碳积累程度最强烈。

4 结论

4 种人工林土壤 TOC 含量差异显著($P<0.05$),依次为:马占相思林>大叶相思林>湿地松

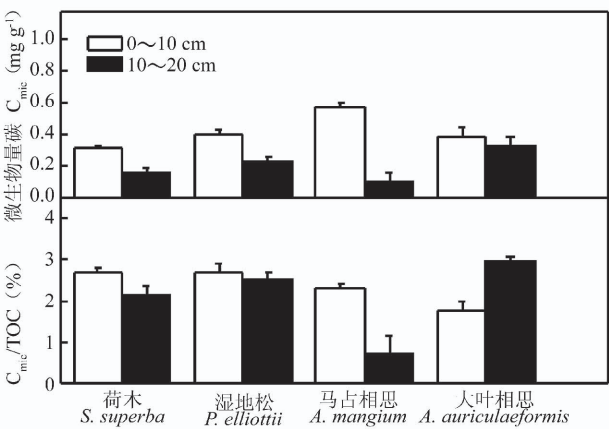


图 2 不同植被类型土壤微生物碳和土壤有机碳的比值
Fig. 2 The ratio of microbial carbon (C_{mic}) to total organic carbon (TOC) in soils of different plantations

林>荷木林,其中,豆科人工林有机碳含量显著高于非豆科人工林,马占相思林 TOC 含量约为荷木林的 2 倍。

随着土层深度的增加,土壤易分解碳库的周转时间也增加,荷木林表土层的易分解碳库最大($7.80\ mg\ g^{-1}$),潜在周转时间最短(49 d),且马占相思林表土层的易分解碳库和 C_{lab}/TOC 值最小(分别为 $2.14\ mg\ g^{-1}$ 和 8.63%),说明马占相思林土壤有机碳库的稳定性好。

表土层的土壤微生物碳含量依次为马占相思林>大叶相思林>湿地松林>荷木林,马占相思林显著高于其它 3 种人工林,另外 3 种林型间差异不显著;亚表土层的大叶相思林土壤微生物碳最大,显著高于其它林型,马占相思林最小,与表土层的格局相反。从微生物碳与土壤有机碳之比(C_{mic}/TOC)看,马占相思林土壤碳积累可能接近平衡,而其它 3 个林型土壤碳则处于明显的积累阶段,但这仍有待进一步的验证。

可见,人工林土壤有机碳积累水平与其土壤碳的稳定性密切相关,也与表层土壤微生物量有关。荷木人工林土壤有机碳积累水平低,其易分解碳库比例大、周转时间短和微生物量低是重要原因,相反,马占相思碳积累水平高则与其易分解碳库最小、微生物量最高有关。

参考文献

[1] Julian D. Carbon sequestration, soil conservation, and the Kyoto Protocol: Summary of implications [J]. *Climat Change*, 2004, 65: 255–261.
[2] Hagedorn F, Maurer S, Egli P, et al. Carbon sequestration in forest soils: Effects of soil type, atmospheric CO_2 enrichment, and N

deposition [J]. *Eurp J Soil Sci*, 2001, 52: 619–628.
[3] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 2002, 66: 1981–1987.
[4] Ren H(任海), Peng S L(彭少麟), Yu Z Y(余作岳). Study on biomass and net productivity of typical plantation communities in Guangdong [J]. *Dev Res Netw Nat Resour Environ Ecol*(资源生态环境网络研究动态), 1996, 7(3): 22–25. (in Chinese)
[5] Gu W(顾伟), Li Z A(李志安), Zou B(邹碧), et al. Carbon sequestration in soils of rehabilitated plantations on severely eroded lands in tropical China [J]. *J Trop Subtrop Bot*(热带亚热带植物学报), 2007, 15(5): 369–376. (in Chinese)
[6] Batjes N H, Sombroek W G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils [J]. *Glob Change Biol*, 1997, 3: 161–173.
[7] Harrison A F, Ineson P, Heal O W. *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystem: Field Methods, Application and Interpretation* [M]. Barking: Elsevier, 1990: 246–258.
[8] Shen W J(申卫军), Peng S L(彭少麟), Zhou G Y(周国逸), et al. Hydrological properties and water balance of grassland ecosystem in Heshan Hill Region [J]. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), 2000, 24(2): 162–168. (in Chinese)
[9] Zou X M, Ruan H H, Fu Y, et al. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation-incubation procedure [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37: 1923–1928.
[10] Vance E, Brookes P, Jenkinson D. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19: 703–707.
[11] Liu G S(刘光崧), Jiang N H(蒋能慧), Zhang L D(张连第), et al. *Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles* [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996: 7–9, 24–40. (in Chinese)
[12] Jens L, Michael Z, Jürg F. Simulating decomposition of labile soil organic carbon: effects of pH [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, 40: 2948–2951.
[13] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. *Science*, 2002, 13(298): 2173–2175.
[14] Charles T, Garten Jr, Paul J H. Measured forest soil C stocks and estimated turnover times along an elevation gradient [J]. *Geoderma*, 2006, 136: 342–352.
[15] Laskowski R, Niklinska M, Maryanski M. The dynamics of chemical-elements in forest litter [J]. *Ecology*, 1995, 5(76): 1393–1406.
[16] Cote B, Fyles J W. Nutrient concentration and acid-base status of leaf-litter of tree species characteristic of the hardwood forest of southern Quebec [J]. *Can J For Res*, 1994, 1(24): 192–196.
[17] Li Z A, Peng S L, Rae D J, et al. Litter decomposition and nitrogen mineralization of soils in subtropical plantation forests of southern China, with special attention to comparisons between legumes and non-legumes [J]. *Plant Soil*, 2001, 229: 105–116.
[18] Zhu L Q(朱连奇), Zhu X Y(朱小玉), Li X X(李秀霞). Progress in soil organic carbon research [J]. *J Henan Univ*(河南大学学报),

2006, 36(3): 72–75.(in Chinese)

[19] Wu J G(吴建国), Zhang X Q(张小全), Xu D Y(徐德应). Impact of land-use change on soil carbon storage [J]. Chin J Appl Ecol (应用生态学报), 2004, 15: 593–599.(in Chinese)

[20] Zou B(邹碧), Li Z A(李志安), Ding Y Z(丁永祯), et al. Litterfall of common plantations in south subtropical China [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2006, 26(3): 715–721.(in Chinese)

[21] Ding M M, Yi W M, Liao L Y, et al. Effects of afforestation on microbial biomass and activity in soils of tropical China [J]. Soil Biol Biochem, 1992, 24(9): 865–872.

[22] Insam H, Domsch K H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sits [J]. Microb Ecol, 1988, 15: 177–188.

[23] Yi Z G(易志刚), Yi W M(蚁伟民), Zhou G Y(周国逸), et al. Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2003, 23 (8): 1674–1679.(in Chinese)

[24] Zhou L X(周丽霞), Yi W M(蚁伟民), Yi Z G(易志刚), et al. Soil microbial characteristics in rehabilitation process of degraded ecosystems in Heshan [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2004, 12(3): 202–206.(in Chinese)