

Effects of Forest Management Practices on Labile Organic Carbon of Soils in Subtropics China

Jian ZHANG^{1,3}, Silong WANG^{2,3}, Yanhui SUI⁴, Yang ZHENG¹

¹ Art College, Shandong University at Weihai, Weihai, PR China

² Institute of Applied Ecology, CAS, Shenyang, PR China

³ Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Huitong, PR China

⁴ Dept. of Biology and Chemical engineering, Weihai Vocational College, Weihai 264210, PR China

Email: rczhjxmw@163.com

Abstract: Labile organic carbon (LOC) of soils has been accepted as sensitive indicators of forest soil quality. This paper analyzed the comparisons of LOC of soils under four forest management practices after 25 years of deforestation of the first rotation of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation. The results showed that natural restoration after fallow (M4) resulted in the highest contents of soil total organic carbon (SOC) and LOC pools, and the highest percent of these LOC pools to SOC. But all of them were the lowest under successive rotation of Chinese fir plantation (M1). The values of WSOC and its ratio to SOC increased in the order: M4 > mixed stand of conifer and evergreen broad-leaved tree species (M3) > rotation of conifer and evergreen broad-leaved tree species (M2) > M1, while those of other LOC pools increased in the order: M4 > M2 > M3 > M1. Hence, natural restoration after fallow was the most effective management practice for forest ecosystem restoration. Both mixed stand and rotation of conifer and evergreen broad-leaved tree species can be considered as a sustainable production pattern of Chinese fir plantation under the silvicultural management regime in subtropical China. The ratio of hot water-extractable carbon (HWC) to SOC (HWC/SOC) was an effective indicator of turnover and dynamics of LOC pools in forest soils.

Keywords: forest management practice; natural restoration after fallow; subtropics; forest ecosystem; soil labile organic carbon; *Cunninghamia lanceolata*

不同经营模式对亚热带森林土壤活性有机碳的影响

张 剑^{1,3}, 汪思龙^{2,3}, 隋艳晖⁴, 郑阳¹

¹ 山东大学威海分校艺术学院, 威海, 中国, 264209

² 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳, 中国, 110016

³ 湖南会同森林生态系统国家野外研究站, 会同, 中国, 418307

⁴ 威海职业学院生物与化学工程系, 威海, 中国, 264210

Email: rczhjxmw@163.com

摘 要: 土壤活性有机碳能够敏感地反映森林生态系统土壤质量的变化。本研究以中国亚热带地区为研究对象, 分析比较了一代杉木(*Cunninghamia lanceolata*)纯林采伐 25 年后, 通过四种不同经营模式所形成的森林类型中土壤活性有机碳的差异。结果表明, 土壤总有机碳、各种活性有机碳及其占总有机碳的比重均以撂荒模式(M4)最高, 针叶连栽模式(M1)最低, 针阔轮栽(M2)与针阔混交(M3)模式介于二者之间。除了土壤水溶性有机碳及其占总有机碳的比重表现为 M3>M2 外, 其他活性碳库及其比重均表现为 M2>M3。因此, 撂荒模式是亚热带地区森林生态系统恢复的最优模式, 针阔轮栽和针阔混交是杉木人工林可持续经营的有效途径。土壤热水浸提有机碳占总有机碳的比例(HWC/SOC)是表征表层土壤生物活性有机碳库周转的较好指标, 可以用来指示土壤生物活性有机碳库的动态变化。

关键词: 森林经营措施; 撂荒; 亚热带; 森林生态系统; 土壤活性有机碳; 杉木

1 引言

基金项目: 国家自然科学基金项目(30470303); 中科院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-405); 山东大学威海分校人才工程项目

以全球变暖为主要特征的气候变化对世界经济、社会和生态环境等产生了重大影响, 严重威胁着世界各国经济的可持续发展。生态系统碳循环是联系温室气体排

放、全球气候变化以及土地利用变化等重大问题的纽带^[1]。土壤碳库作为陆地生态系统中最大的碳库，其微小的变化，都会引起大气 CO₂ 浓度的较大变动。因此，研究陆地土壤碳循环过程的控制及反馈机制，是预测大气 CO₂ 含量及全球气候变化的基础，也是合理有效利用土地资源，缓解温室效应的依据。但是，土壤有机碳总量的变化非常缓慢，很难观测到其短期内的微小变化，在森林土壤中表现得更为明显^[2]。许多研究已表明，土壤活性有机碳虽然只占总有机碳的一小部分，却是土壤生态系统中最重要、最活跃的部分，他们直接参与土壤生物化学转化过程，且在受到干扰后会有较大的波动，能够在土壤全碳变化之前反映出土壤管理措施和环境引起的土壤微小变化。因此，可作为土壤质量和潜在生产力的敏感指标^[3,4]。土壤活性有机碳可用水溶性有机碳（WSOC）、微生物量碳（MBC）、热水浸提有机碳（HWC）以及碳水化合物（HWCc）等来进行表征。

森林土壤有机碳在全球碳循环中发挥着极其重要的作用。由于不同经营模式下的人为干扰程度、土壤承接凋落物和根系分泌物的类型不同，其土壤碳库特别是活性有机碳状况会存在很大差异。因此，研究同一地区不同森林经营模式下土壤活性有机碳的差异，对揭示区域森林土壤碳循环规律，科学修复退化森林生态系统具有重要意义。杉木人工林是我国亚热带地区最主要

的森林类型之一，但多代连栽导致地力衰退，生态系统退化。为此，本文主要研究亚热带地区四种典型森林经营模式，即针叶连栽模式、针阔混交模式、针阔混交模式以及撂荒模式，对土壤活性碳库和矿化有机碳的影响，以探索该地区森林生态系统复位、杉木人工林土壤可持续经营以及保持其长期生产力的有效模式，为更好的发挥森林土壤的碳汇功能提供理论依据。

2 研究方法

2.1 研究样地概况

研究样地为中国科学院会同森林生态实验站实验林场内的四种不同经营模式的林地，即 1982 年秋第 1 代人工杉木林皆伐后，1983 年春在皆伐迹地上设置了 4 种森林类型，包括 3 种人工林生态系统，即杉木（*Cunninghamia lanceolata*）纯林、火力楠（*Michelia macclurei*）纯林以及杉木与火力楠的针阔混交林（杉木与阔叶树的比例为 8:2）和 1 种撂荒模式形成的次生杂木林。四种林地分别代表针叶连栽（M1）、针阔轮栽（M2）、针阔混交（M3）和撂荒（M4）四种森林经营模式，其林地基本概况见表 1。3 种人工林密度均为 2000 株 / hm²，撂荒样地中树种组成以多种栲（*Castanopsis ssp.*）、栲（*Castanopsis ssp.*）、青冈（*Cyclobalanopsis glauca*）和石栲（*Lithocarpus ssp.*）等阔叶树为主。

Table 1 General situation of different forest stands and soil physico-chemistry properties.

表 1 林地基本概况及其土壤基本理化性质

森林经营模式 Forest Management Practices	pH	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	海拔 Elevation (m)
M1	4.94	1.27	1.68	0.18	18.58	521
M2	4.57	1.09	1.92	0.23	18.92	521
M3	4.91	1.18	1.69	0.23	18.98	521
M4	4.25	1.18	2.36	0.25	20.48	521

2.2 样品采集与处理

试验中土壤样品均为表层土壤(0—10 cm)，于夏季采自 4 种林型。具体采样方法为：每一林地选择 3 个具有代表性的样地，每个样地面积为 10 m × 10 m。在每块样地内随机选取 10 个点，去除地表凋落物层，然后用直径为 4.5 cm 的取土钻进行采样，10 个点的样组成一个混合土样。去掉土壤中可见植物根系和残体。将土样分为两部分，一部分新鲜土样过 2 mm

筛后放置于冰箱中（3~4℃）供测定土壤微生物量碳和水溶性有机碳，另一部分土壤风干后过 2 mm 和 0.25 mm 筛，供测定热水浸提有机碳、热水浸提碳水化合物、总有机碳和其他土壤理化性质。

2.3 测定方法

水溶性有机碳（WSOC）按 McGill 等^[5]的方法进行测定；土壤微生物量碳（MBC）测定采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法^[6]；热水浸提有机碳和碳水化合物按

Haynes 和 Francis^[7]的方法测定;土壤总有机碳(SOC)采用重铬酸钾加热法测定;土壤全氮采用凯氏法;全磷采用酸溶(硫酸+高氯酸)-钼锑比色法;全钾采用酸溶(轻氟酸+高氯酸)-比色法测定;pH 值采用电位法;土壤容重采用环刀法测定^[8]。

2.4 数据分析

根据野外调查观测资料和实验室内的分析资料,用 EXCEL(2003)图表处理软件和 SPSS(13.0)统计分析软件进行数据处理分析。其中,数据进行 One-way ANOVA 方差分析,并用 LSD 多重比较法进行差异显著性分析,相关性分析采用 Pearson 检验法。

3 结果与讨论

3.1 不同经营措施对土壤总有机碳的影响

不同经营措施对土壤总有机碳含量的影响如表 2 所示,可以看出撂荒模式下土壤总有机碳含量明显高于其他三种模式;其他三种模式中以针阔轮栽模式最高,轮栽与混交模式之间没有显著差异。表明,与连栽模式相比,撂荒与针阔轮栽模式可显著提高土壤有

机碳总量,而针阔混交的影响较小。

土壤有机碳的变化一方面受到人为干扰的影响,另一方面也与植被类型的差异有关。人工林经营过程中的采伐、炼山、整地等措施导致土壤有机碳含量急剧下降^[9,10]。撂荒林地由于受到的人为干扰较少,因此,土壤有机碳含量较高。此外,不同森林植被输入到土壤中的凋落物的数量和质量差异也是导致土壤有机碳变化的主要原因。针叶树种凋落物 C/N 比高、难降解有机碳的含量大,加之数量少,土壤有机碳积累缓慢^[11,12]。与杉木连栽模式相比,针阔混交模式尽管对土壤有机碳的增加有一定的促进作用,但效果并不明显,这与前人的研究结果一致^[13,14]。Montagnini^[15]对热带地区人工林的研究结果也表明,人工纯林和混交林之间土壤有机碳含量没有明显差异。黄宇等^[16]和 Wang 等^[17]分别报道了,二代杉木纯林、杉木桉木(*Alnus cremastogyne*)混交林、杉木刺楸(*Kalopanax septemlobus*)混交林(杉木与阔叶树的比例均为 8:2),在造林 13 年和 15 年后各林地之间土壤总有机碳含量都没有显著差异。但也有人报道,杉木与观光木混交后土壤有机碳含量明显增加^[18]。

Table 2 Comparisons of SOC and dissolved organic carbon under different forest management practices.

表 2 不同森林经营措施下土壤总有机碳和溶解性有机碳的比较

森林经营模式 Forest Management Practices	土壤总有机碳 SOC (g kg ⁻¹)	水溶性有 机碳 WSOC (mg kg ⁻¹)	热水浸提有 机碳 HWC (mg kg ⁻¹)	热水浸提碳水 化合物 HWcC (mg kg ⁻¹)	WSOC/SOC (%)	HWC/SOC (%)	HWcC/SOC (%)
M1	21.80 c	35.05 d	669.60 d	331.83 c	0.16 d	3.07 c	1.52 c
M2	24.92 b	65.53 c	908.86 b	444.82 b	0.26 c	3.65 b	1.79 b
M3	21.99 c	89.08 b	785.67 c	440.11 b	0.40 b	3.58 b	2.00 a
M4	28.76 a	127.67 a	1371.79 a	557.16 a	0.44 a	4.77 a	1.94 ab

表中同一列中的字母表示 P<0.05 水平上的差异显著性。

Values with the different letter in a row are significantly different at P<0.05.

3.2 不同森林经营措施对土壤溶解性有机碳的影响

土壤 WSOC 土壤中移动比较快、易氧化分解和矿化,是养分移动的载体因子,对植物、微生物的活性较高,对土地利用方式变化比较敏感^[19]。本研究,不同经营模式土壤 WSOC 含量及其占总有机碳的比例均表现为 M4>M3>M2>M1,且差异显著,其范围分别为 35.05~127.67 mg·kg⁻¹和 0.16~0.44% (表 2)。表明,与杉木连栽模式相比,撂荒、针阔轮栽和

针阔混交三种经营模式均有利于土壤养分的迁移以及稳定性有机碳向 WSOC 的转化,这对林地生产力的提高具有重要意义。凋落物和细根是土壤水溶性有机碳的主要来源^[20]。一些模拟试验结果也表明,火力楠与杉木凋落物混合分解时表现出相互促进的作用^[11],添加混合叶凋落物土壤中水溶性有机碳含量高于添加纯杉木叶凋落物土壤^[21],而且火力楠细根比杉木细根更显著地增加土壤溶解性有机碳的含量^[22]。凋落物和细根的化学成分可能是导致这一结果的主要原因,与杉木凋落物和细根相比,阔叶树凋落物和细根 C/N 小、

初始氮含量高，微生物较容易利用，自身分解较快，有利于土壤活性有机碳的积累。

土壤 HWC 是反映森林土壤有机碳质量变化的敏感指标^[23]。本研究中土壤 HWC 的含量为 669.60 ~ 1371.79 mg·kg⁻¹，其中，以撂荒经营模式下土壤 HWC 含量最高，M2> M3 > M1，且均达到差异显著水平（P<0.05）。土壤热水浸提有机碳占总有机碳的比例（HWC/SOC）也以撂荒模式最大，杉木连栽模式最小，为 3.07~4.77%之间，在 Leinweber 等^[24]报道的 3~5% 的范围内。此外，不同林分类型土壤 HWC 中碳水化合物占 41~56%，HWcC 与热水浸提有机碳含量的变化规律一致，针阔混交与针阔轮栽模式之间差异不显著。但 HWcC 占总有机碳的比例表现为针阔混交模式最高，杉木连栽模式最低。

3.3 土壤微生物量碳

不同的经营模式对土壤 MBC 的影响是非常明显的（表 3）。撂荒模式下土壤 MBC 含量明显高于其他三种模式；与连栽模式比较，微生物碳含量在针阔混交与针阔轮栽模式下分别提高了 35.4%和 78.2%。许多研究也表明^[14,16]，杉木与阔叶树种混交后，土壤微生物量碳含量明显增加。王清奎等^[21]通过室内模拟试验发现，杉木与阔叶树种混合分解能明显提高土壤微生物量的含量。

微生物熵（MBC/SOC）是土壤有机质变化的一个指示指标，如果土壤退化，微生物量碳下降的速度大于总有机碳的下降，因而微生物熵随之降低^[25]。本研

究中，土壤微生物熵以撂荒模式林地中最高，针阔混交与针阔轮栽模式均高于针叶连栽模式（表 3），表明撂荒模式最有利于土壤中微生物量碳比重的增强，从而为土壤总有机碳的积累提供条件；而针叶轮栽模式是导致土壤退化最为严重的森林经营模式。这与其他大多数研究结果一致，许多研究^[14,16]发现，不同类型的针阔混交林土壤微生物量碳含量和微生物熵均高于杉木纯林。这主要是由不同植被类型之间凋落物的化学结构、组成、根系的分布以及根系活力的差异造成的。Hu 等^[26]通过两年的野外模拟培养试验也证实了以上结论。

Table 3 Comparisons of microbial biomass C and microbial quotient under different management practices.

表 3 不同经营措施下微生物量碳以及微生物熵的比较

森林经营模式 Forest Management Practices	土壤微生物量碳 MBC (mg·kg ⁻¹)	土壤微生物熵 MBC/SOC (%)
M1	146.1 d	0.67 c
M2	260.2 b	1.04 b
M3	197.8 c	0.90 b
M4	365.4 a	1.27 a

同一列中的字母表示 P < 0.05 水平上的差异显著性。
Values with the different letter in a row are significantly different at P < 0.05

3.4 土壤各活性碳库之间的关系

土壤活性有机碳对于预测土壤质量的变化具有重要意义，许多学者对土壤活性有机碳及其生物有效性进行了一些研究。本研究中，相关性分析结果表明（表

Table 4 Correlations between different soil labile organic carbon pools.

表 4 土壤各活性有机碳库各指标之间的关系

	HWcC/SOC	HWC/SOC	WSOC/SOC	MBC/SOC	HWcC	HWC	WSOC	MBC
HWC/SOC	0.585*							
WSOC/SOC	0.853***	0.767**						
MBC/SOC	0.643*	0.870***	0.735**					
HWcC	0.764**	0.906***	0.850***	0.957***				
HWC	0.469	0.975***	0.698*	0.893***	0.903***			
WSOC	0.743**	0.889***	0.956***	0.854***	0.934***	0.868***		
MBC	0.521	0.891***	0.685*	0.980***	0.939***	0.943***	0.848***	
SOC	0.304	0.847***	0.555	0.886***	0.845***	0.941***	0.768**	0.958***

*, ** and *** are significant at P<0.05, P<0.01 and P<0.001 respectively (two-tailed, n=12)

*, **和***分别表示 P<0.05, P<0.01 和 P<0.001 水平上相关性显著(n=12)。

4），土壤各溶解性有机碳含量与 MBC、MBC/SOC 以及 SOC 之间均具有极显著的正相关关系，并且他们

两两之间也达到极显著正相关。这一方面说明了土壤溶解性有机碳是微生物有效的底物；另一方面，也说

明了土壤溶解性有机碳和微生物特征很大程度依赖于土壤总有机碳的含量,这与其他大多数研究结果一致[19,21]。

此外, HWC/SOC 与其他参数之间均达到显著或极显著正相关关系,而且操作过程简单,因此, HWC/SOC 可以表征表层土壤生物活性有机碳库周转的较好指标,可以用来指示土壤生物活性有机碳库的动态变化。但倪进治等^[27]对不同土地利用方式以及不同土壤类型下活性有机碳的生物有效性的研究结果表明, WSOC/SOC 是表征土壤生物活性有机碳库周转的较好指标。这种差异可能是由于研究区域、土壤类型、土地利用类型等方面的差异造成的。

4 结论

四种森林经营模式中,以撂荒模式最有利于森林土壤活性有机碳的增加和土壤总有机碳的积累,是促进亚热带地区森林生态系统恢复的最有效的途径。其他三种经营模式中,针叶连栽模式导致土壤退化现象最为严重,不宜作为森林可持续经营的有效模式。针阔混交和针阔轮栽模式介于撂荒模式和连栽模式之间,在带来一定经济收益的同时,发挥更有效的生态功能。

土壤热水浸提有机碳占总有机碳的比例 (HWC/SOC) 是表征表层土壤生物活性有机碳库周转的较好指标,可以用来指示土壤生物活性有机碳库的动态变化。

References (参考文献)

- [1] Huang Yao, Zhou Guangsheng, Wu Jinshui, et al. Modelling carbon budgets of terrestrial ecosystems in China[M]. Beijing: Science Press, 2008. 1-7(Ch).
黄耀, 周广胜, 吴金水, 等. 中国陆地生态系统碳收支模型[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 1-7
- [2] Bolinder L C, Angers D A, Gregorich E G, et al. The response of soil quality indicators to conservation management [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1999, 79: 37-45
- [3] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soil in New Zealand [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32: 211-219.
- [4] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, et al. The effects of organic and conventional management on biologically active soil organic matter fractions [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1130-1139.
- [5] McGill W B, Cannon K R, Robertson J A, et al. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L. after 50 years of cropping to two rotations [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1986, 66: 1-19.
- [6] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: an automated procedure [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1990, 22: 1167-1169.
- [7] Haynes R J, Francis G S. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions [J]. Journal of Soil Science, 1993, 44: 665-675.
- [8] Lu Rukun. Methods of Soil Agricultural Chemistry Analysis [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000. 24-288. (Ch).
鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 24-288.
- [9] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, et al. Carbon and nitrogen pools in Chinese fir and evergreen broadleaved forests and changes associated with felling and burning in mid-subtropical China [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 216: 216-226.
- [10] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, et al. Effects of slash burning on nutrient removal and soil fertility in Chinese fir and evergreen broadleaved forests of mid-subtropical China [J]. Pedosphere, 2003, 13(1): 87-96.
- [11] Liao Liping, Wang Silong, Gao Hong, et al. Foliar litter decomposition of Chinese fir and main broad-leaved plantation species in subtropics [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(supp.): 141-145. (Ch).
廖利平, 汪思龙, 高洪, 等. 杉木与亚热带主要阔叶造林树种叶凋落物的分解[J]. 应用生态学报, 2000, 11(supp.): 141-145
- [12] Don A, Kalbitz K. Amounts and degradability of dissolved organic carbon from foliar litter at different decomposition stages [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37: 2171-2179
- [13] Zhang J., Wang S., Feng Z., et al. Stability of soil organic carbon changes in successive rotations of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook) plantations [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21: 352-359.
- [14] Huang Y, Feng Z W, Wang S L, et al. Changes in soil quality due to introduction of broadleaf trees into clear-felled Chinese fir forest in the mid-subtropics of China [J]. Soil Use and Management, 2004, 20: 418-425.
- [15] Montagnini F. Accumulation in above-ground biomass and soil storage of mineral nutrients in pure and mixed plantations in a humid tropical lowland [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 134: 257-269.
- [16] Huang Yu, Feng Zongwei, Wang Silong, et al. Effects of Chinese fir mixing with N-fixing and non-N fixing tree species on forestland quality and forest-floor solution chemistry[J]. Acta Ecologica Sinica, 24(10): 2192-2199. (Ch).
黄宇, 冯宗伟, 汪思龙, 等. 杉木与固氮和非固氮树种混交对林地土壤质量和土壤水化学的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2192-2199
- [17] Wang Q K, Wang S L, Fan B, et al. Litter production, leaf litter decomposition and nutrient return in *Cunninghamia lanceolata* plantations in south China: effect of planting conifers with broadleaved species [J]. Plant and Soil, 2007b, 297: 201-211.
- [18] Zheng Y S, Ding Y X. Effect of mixed forests of Chinese fir and *tsong's tree* on soil properties [J]. Pedosphere, 1998, 8: 161-168.
- [19] Jiang Peikun. Soil active carbon pool under different types of vegetation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(1): 10-13. (Ch).
姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. 林业科学, 2005, 41(1): 10-13
- [20] Kalbitz K, Schwesig D, Rethemeyer J, et al. Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37, 1319-1331.
- [21] Wang Qingkui, Wang Silong, Yu Xiaojun, et al. Effects of *Cunninghamia lanceolata*-broadleaved tree species mixed leaf litters on active soil organic matter [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1203-1207. (Ch).
王清奎, 汪思龙, 于小军, 等. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1203-1207.

- [22] Liu Yan, Wang Silong, Wang Xiaowei, et al. Effects of tree species fine root decomposition on soil active organic carbon [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 481-486. (Ch).
刘艳, 汪思龙, 王晓伟, 等. 不同温度条件下杉木、桉木和火力楠细根分解对土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 481-486.
- [23] Wang Q K, Wang S L. Soil organic matter under different forest types in Southern China [J]. Geoderma, 2007a, 142: 349-356.
- [24] Leinweber P, Schulten H R, Körschens M. Hot water extracted organic matter: Chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment [J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 20: 17-23.
- [25] Balota E L, Colozzi F A, Andrade D S, et al. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems [J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 38: 15-20.
- [26] Hu Y L, Wang S L, Zeng D H. Effects of Single Chinese Fir and Mixed Leaf Litters on Soil Chemical, Microbial Properties and Soil Enzyme Activities [J]. Plant and Soil, 2006, 282: 379-386.
- [27] Ni Jinzhi, Xu Jianmin, Xie Zhengmiao. The size and characterization of biologically active organic carbon pool in soils [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(1): 56-63. (Ch).
倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤生物活性有机碳库及其表征指标的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1): 56-63