

不同密度巨桉人工林土壤有机碳 及微生物量碳氮特征

向元彬, 黄从德*, 胡庭兴, 涂利华, 李仁洪, 颜震, 普梅

(四川农业大学 林学院, 四川省林业生态工程省级重点实验室, 四川雅安 625014)

摘要: 通过原位试验, 对华西雨屏区不同密度[833 株·hm⁻²(A1)、1 333 株·hm⁻²(A2)、2 222 株·hm⁻²(A3)]巨桉(*Eucalyptus grandis*)人工林土壤有机碳和微生物量碳氮动态特征进行了研究。结果显示:(1)各密度巨桉林分土壤有机碳含量在夏季和秋季较高, 春季和冬季较低, 但季节变化相对平稳, 而它们土壤有机碳含量年平均值分别为 22.54 g·kg⁻¹(A1)、19.76 g·kg⁻¹(A2)、16.84 g·kg⁻¹(A3), 且密度间差异达到显著水平。(2)各密度林分土壤微生物生物量碳氮呈现出与土壤有机碳相似的规律性季节变化, 随着林分密度增加, 林下土壤微生物生物量碳氮含量减小。(3)土壤微生物熵一年内的波动较小, 分别处于 2.30%~2.44%(A1)、2.14%~2.39%(A2)、2.47%~2.69%(A3)之间。(4)各密度林分土壤微生物生物量碳氮含量与其立地土壤有机碳、水解氮、有效磷、速效钾均存在显著相关关系。研究表明, 华西雨屏区不同密度巨桉人工林土壤有机碳含量、微生物生物量碳氮含量、微生物熵季节变化相对平稳, 但受到人工林密度的显著影响, 并随巨桉密度增加土壤有机碳含量、微生物生物量碳氮含量有降低的趋势。

关键词: 巨桉人工林; 土壤有机碳; 土壤微生物生物量碳; 土壤微生物生物量氮

中图分类号: Q948.12⁺2.3

文献标志码: A

Characteristics of Soil Organic Carbon and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in *Eucalyptus grandis* Plantations with Different Densities

XIANG Yuanbin, HUANG Congde*, HU Tingxing, TU Lihua, LI Renhong, YAN Zhen, PU Mei

(College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Laboratory of Forestry Ecology Engineering, the Provincial Key Laboratory of Sichuan Province, Ya'an, Sichuan 625014, China)

Abstract: With *in situ* experiment, the soil organic carbon (SOC), microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN) were analyzed in *Eucalyptus grandis* plantations with different stand densities (A1: 833 tree·hm⁻², A2: 1 333 tree·hm⁻² and A3: 2 222 tree·hm⁻²) in Rainy Area of Western China. The results were given as follows: (1) SOC in every stand with different densities were higher in summer and autumn, lower in spring and winter, but seasonal changes was relatively stable. The annual average SOC was 22.54 g·kg⁻¹(A1), 19.76 g·kg⁻¹(A2), 16.84 g·kg⁻¹(A3), and the difference between the density reached significant level; (2) MBC and MBN exhibited a clear seasonal pattern in every stand with different densities, the same as the SOC, with the increase of the density, soil microbial biomass carbon and nitrogen content were less; (3) The fluctuations of microbial quotient were slightly in the plantations with different densities. The microbial quotient fluctuated between 2.30%—2.44%(A1), 2.14%—2.39%

收稿日期: 2013-12-25; 修改稿收到日期: 2014-06-16

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAC01A11, 2008BAD02B01)

作者简介: 向元彬(1983—), 在读博士生, 主要从事森林生态系统经营与管理研究。E-mail: tbrain@163.com

* 通信作者: 黄从德, 教授, 博士生导师, 主要从事森林碳循环、森林资源调查理论与技术研究。E-mail: lyxqx100@yahoo.com.cn

(A2) and 2.47%—2.69%(A3), respectively. (4) The part of MBC(N) with SOC, available N(P,K) had a significant relation in different densities ($P < 0.05$). Consequently, the seasonal changes of the *E. grandis* plantation SOC, MBC, MBN and the microbial quotient were relatively stable, but the different stand density had a significant effect on them, and with the increase of density, the content of soil organic carbon, microbial biomass carbon and nitrogen decreased in Rainy Area of West China.

Key words: *Eucalyptus grandis* plantation; soil organic carbon; soil microbial biomass carbon; soil microbial biomass nitrogen

全球土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)约为 1.55×10^{12} t(0~1 m 土层),是地球表层最大有机碳库,是大气碳库 3 倍,生物碳库 3.8 倍^[1]。它是营养元素生物地球化学循环的主要组成部分,也是土壤质量评价和土地可持续利用管理中必须考虑的重要指标^[2]。土壤微生物生物量(MB)指土壤中体积小于 $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ 生物总量,广义上包括土壤微生物 C、N、P、S 等^[3-4],它控制土壤有机质转化并影响碳积累。土壤微生物生物量仅占有机碳 1%~3% 和有机氮 2%~6%,却参与了生态系统养分循环和有机质分解等生态过程,是土壤有机质和土壤养分转化与循环的动力因素之一^[5-8]。在森林生态系统中,微生物生物量被认为是反映土壤质量发展和退化的重要指标^[9-10],这势必要考虑林分密度、土壤水分、养分等生态因子可能对它引起的变化,而研究这些生态因子对它的影响就显得极其重要^[11-12]。

我们推测同种林分不同密度可能会影响或改变土壤有机碳、土壤微生物生物量碳氮含量,但目前这方面研究还很少。已有研究主要集中在生态系统不同演替阶段^[13-15]、生态系统恢复和退化过程^[16-17]、不同植被类型^[7,18-19]、不同海拔梯度^[8,18]、不同土地利用方式^[20]以及模拟氮沉降^[21]等方面,取得了丰硕成果,但忽视了同种林分不同密度对其的影响或改变。巨桉是中国重要经济植物资源,该速生树种对土壤养分需求量较大,从而使林地立地条件日益衰退,而不同密度可能会影响林地土壤养分含量。因此,本文从不同密度中龄巨桉人工林林地土壤养分,特别是土壤有机碳、土壤微生物生物量碳(MBC)、土壤微生物生物量氮(MBN)等方面进行研究,对林地土壤碳氮循环、土壤化学、生物化学特性等方面具有极其重要意义,为在该区域科学发展与管理巨桉人工林,深入研究巨桉人工林土壤碳动态提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验地位于四川省雅安市雨城区老板山(29°58'N, 102°59'E),海拔 580 m,坡向偏北,坡度 5°,属

中亚热带湿润气候,年平均降雨量 1 772.2 mm,月平均气温 3.7℃(1月)~29.9℃(7月)。试验区内巨桉人工林栽植于 2003 年,树龄为 5 年,总面积约 1 hm²;试验共设置 3 种密度,它们分别为 833 株·hm⁻²(1.5 m×8 m, A1)、1 333 株·hm⁻²(1.5 m×5 m, A2)和 2 222 株·hm⁻²(1.5 m×3 m, A3),每种密度面积约 0.3 hm²。土壤为酸性紫色土,土层厚度>50 cm,各密度样地土壤养分含量状况见表 1,不同密度巨桉林分特征见表 2,林地其他条件基本一致。

1.2 试验设计及样品采集

2008 年 3 月在 A1、A2、A3 巨桉林内,每一个密度分别随机布置 3 个 3 m×3 m 的样方,共计 9 个样方。于 2008 年 3、5、7、9、11 月及 2009 年 1 月下旬各取土样 1 次,共计取样 6 次。取样时,去除地表的凋落物层,然后用土钻在 0~20 cm 的土层进行采样,每一个样方随机采 6 个点,并混合组成 1 个混合土样,每个密度林分共取 3 个混合土样。

1.3 土壤微生物生物量碳和氮及土壤有机碳、水分、养分含量的测定^[22-24]

土壤微生物生物量碳、氮含量采用氯仿熏蒸-提取法测定;土壤 pH 值用电位法测定;土壤体积含水量用时域反射仪测定;土壤有机碳用重铬酸钾氧化-外加热法测定;水解性氮用碱解-扩散法测定;有效磷采用盐酸-硫酸浸提法测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

1.4 数据处理

利用 SPSS 13.0 软件进行 One-way ANOVA 统计分析,然后以 LSD 多重检验法检验土壤有机碳和土壤微生物生物量碳在不同密度林分间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同密度巨桉人工林立地土壤有机碳含量的动态变化特征

从图 1 可看出,3 种密度林分土壤有机碳含量在夏季和秋季较高,而在春季和冬季含量较低。其

中,3种密度林分土壤有机碳年最大值均出现在7月份,最小值出现在3月份,最大值和最小值的差分别为 $0.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (A1)、 $1.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (A2) 和 $1.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (A3);同时,各密度巨桉林土壤有机碳含量年平均值表现为 $A1(22.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}) > A2(19.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}) > A3(16.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$,且每次测定的各密度之间土壤有机碳含量差异都达到显著水平 ($P < 0.05$)。以上结果表明同一密度巨桉人工林的土壤有机碳含量一年中处于相对稳定状态;随着巨桉林林分密度的增加,其立地土壤有机碳含量有逐渐减少的趋势。

2.2 不同密度巨桉人工林土壤微生物生物量碳、氮的动态变化特征

3种密度林分土壤微生物生物量碳、氮含量呈现出相似的规律性季节变化特征,即都从3月份开始上升,7月份含量达到最大值,此后开始下降,但整个过程变化幅度不大(图2)。A1、A2、A3巨桉林土壤微生物生物量碳含量(MBC)年平均值分别为 536.50 、 437.33 和 $427.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其土壤微生物生物量氮含量(MBN)年平均值分别为 48.01 、 39.67 和 $34.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且A1与A2、A3之间的土壤微生物生物量碳、氮都存在显著差异 ($P < 0.05$)。其中,A1和A2巨桉林土壤微生物生物量碳含量在7月份分别比A3显著提高 28.54% 和 12.33% ,其同期土壤微生物生物量氮含量分别比A3显著提高 36.59% 和 17.07% ($P < 0.05$)。可见,巨桉林土壤微生物生物量碳、氮随季节波动不大,主要与林分密度相关,并且表现为随着人工林密度减小而显著增大的趋势。

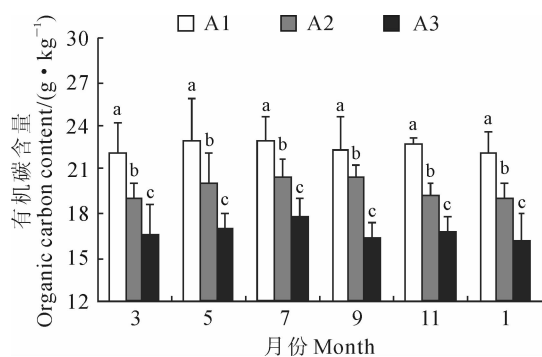


图1 不同密度巨桉人工林土壤有机碳的变化动态
不同字母表示同期处理间差异显著 ($P < 0.05$, $n=3$);下同
Fig. 1 The change of soil organic carbon content in different stand densities of *E. grandis* plantations
Different letters denote treatment means were significantly different ($P < 0.05$, $n=3$); The same as below

2.3 不同密度巨桉人工林的土壤微生物熵变化特征

土壤微生物熵是土壤微生物碳与土壤有机碳的比值,是衡量土壤有机碳损失或积累的重要指标。图3显示,3种密度巨桉林分的土壤微生物熵一年内的波动较小,按林分密度从小到大分别在 $2.30\% \sim 2.44\%$ (A1)、 $2.14\% \sim 2.39\%$ (A2)、 $2.47\% \sim 2.69\%$ (A3)之间波动;从一年的平均值上来看,土壤微生物熵分别为 2.38% (A1)、 2.12% (A2)、 2.54% (A3),以A3的土壤微生物熵较高,并与A1、A2的土壤微生物熵存在显著差异 ($P < 0.05$)。即各密度林地土壤微生物熵也受季节的影响较小,而受密度的影响较大。

2.4 不同密度巨桉人工林土壤养分状况和林地特征

2008年3月采集土样分析表明,各密度巨桉人

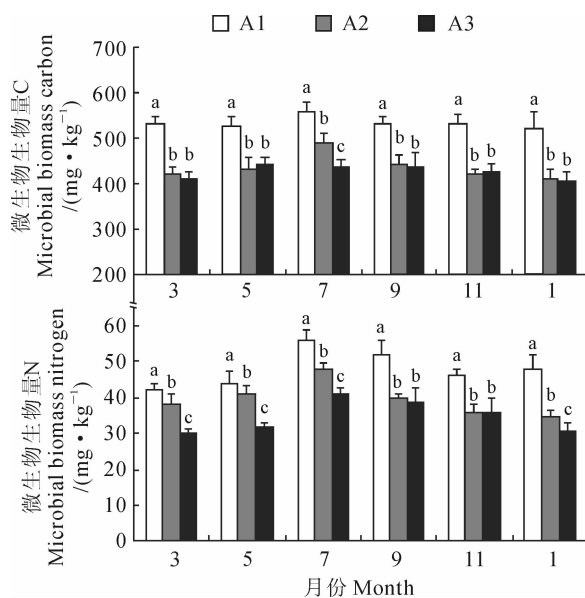


图2 不同密度巨桉人工林土壤微生物生物量碳、氮的变化动态

Fig. 2 Soil microbial biomass carbon and nitrogen in different stand densities of *E. grandis* plantations

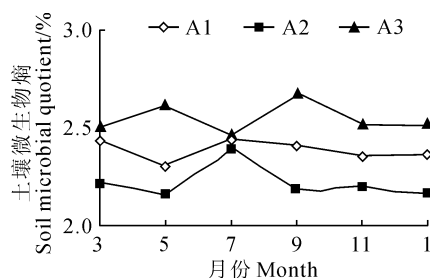


图3 不同密度巨桉人工林微生物熵变化动态

Fig. 3 The change of soil microbial quotient in different stand densities of *E. grandis* plantations

表 1 各密度样地 0~20 cm 土壤养分含量

Table 1 Soil nutrient content from 0~20 cm soil layer in different densities

代号 Code	密度 Density /(tree·hm ⁻²)	全氮 Total N /(g/kg)	碱解氮 Available N /(mg/kg)	全磷 Total P /(g/kg)	有效磷 Available P /(mg/kg)	全钾 Total K /(g/kg)	速效钾 Available K /(mg/kg)
A1	833	0.93	8.23	0.25	86.52	15.67	68.35
A2	1 333	0.88	8.06	0.24	88.32	14.32	67.84
A3	2 222	0.96	8.19	0.24	86.64	15.44	69.06

表 3 不同密度巨桉人工林微生物生物量碳、氮之间及其土壤养分、水分的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil microbial biomass C,soil microbial biomass N,soil nutrients and soil water in different stand densities of *E. grandis* plantations

林分密度 Stand density		微生物量氮 MBN	土壤有机碳 SOC	水解氮 Available N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	pH	水分 Water
A1	MBC	0.924 8**	0.865 7**	0.875 4**	0.982 1**	0.854 1*	0.565 4	0.435 2
	MBN		0.756 3**	0.975 6**	0.743 5*	0.863 5**	0.513 2	0.372 3
A2	MBC	0.863 2**	0.735 6**	0.657 4*	0.842 6*	0.912 4**	0.753 6**	0.375 2
	MBN		0.924 5**	0.897 2**	0.983 6**	0.824 5*	0.621 4*	0.587 1
A3	MBC	0.856 3**	0.732 5*	0.983 5**	0.832 5*	0.521 3	0.536 2	0.485 2
	MBN		0.821 4**	0.953 6**	0.467 2	0.832 5*	0.421 5	0.562 4

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平相关性显著(n=3)。
Note: * and ** stand for significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively(n=3).

工林样地 0~20 cm 土壤养分含量状况基本一致(表 1);2008 年 5 月林分特征调查表明,随着巨桉林密度的增加,巨桉胸径、株高、地被物盖度和地被物种类数减小(表 2)。其中,A1 地被物主要有喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、积雪草(*Centella asiatica*)、糯米草(*Memoralis hirta*)等 18 种;A2 地被物主要有水蓼(*Polygonum hydropiper*)、求米草(*Oplismenus undulatifolius*)、灯心草(*Juncus effusus*)等 13 种;A3 地被物主要有喜旱莲子草、细风轮菜(*Clinopodium gracile*)、糯米草(*Memoralis hirta*)等 10 种。

2.5 不同密度林分土壤微生物生物量碳、氮与其土壤有机碳、养分及其水分含量的关系

相关分析结果(表 3)表明,各林分密度的土壤微生物生物量碳均与其微生物生物量氮极显著正相关($P<0.01$);各林分密度的土壤微生物生物量碳、氮与相应的土壤有机碳含量、水解氮含量均显著或极显著正相关;除 A3 的土壤微生物生物量碳与速效钾含量、微生物生物量氮与有效磷含量相关性不显著($P>0.05$)外,各林分密度的土壤微生物生物量碳、氮还与相应的土壤有效磷、速效钾含量显著或者极显著正相关;而仅 A2 的土壤微生物生物量碳和氮含量与土壤 pH 值分别极显著和显著正相关,各密度林分的土壤微生物生物量碳、氮均与其土壤水分含量相关性不显著($P>0.05$)。以上结果说明

表 2 不同林分密度巨桉林林分特征

Table 2 Stand characteristics of *E. grandis* plantations in different densities

林分特征 Stand characteristics	林分密度 Stand density		
	A1	A2	A3
海拔 Latitude/m	580	580	580
坡度 Slope aspect/°	5	5	5
坡向 Slope position	N	N	N
胸径 DHB/cm	14.4	13.1	8.2
株高 Tree height/m	14.5	14.3	9.4
郁闭度 Canopy density	0.7	0.9	0.9
地被物种类数 Species number of ground cover vegetation	18	13	10
地被物盖度 Ground cover	1	0.5	0.2

各密度林分土壤微生物生物量碳、氮与相应土壤有机碳及速效氮、磷、钾养分含量关系密切。

3 讨 论

3.1 密度对巨桉人工林土壤有机碳及其微生物生物量碳、氮的影响

本研究发现,巨桉林同一密度的土壤有机碳含量最大月与最小月的差在 0.86~1.58 g·kg⁻¹ 范围内变化,在一年中变化幅度很小,处于相对稳定状态,这与肖复明^[25]、徐秋芳^[26]等的研究结果一致。但随着林分密度的减少,巨桉林土壤有机碳含量极显著增加($P<0.01$),其年平均值表现为 A1(22.54

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > A2 (19.76 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > A3 (16.84 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 从季节上来看, 各密度林分土壤有机碳含量夏季和秋季较高, 春季和冬季含量较低。原因可能有两方面, 一是密度小的林分, 郁闭度也越较小, 水热光照条件好, 林下草本层植物种类丰富, 其覆盖度也越大(表 2), 林下草本植物的新陈代谢, 会形成更多的腐殖质, 增加土壤有机碳含量; 二是巨桉叶的凋落期在每年的 4、5 月, 随之进入一个高温多雨的时期, 有利于凋落物的分解转化, 在土壤中形成了新的腐殖质, 因而导致在夏季土壤有机碳含量较高。

何友军等^[19]的研究表明, 常绿阔叶林土壤微生物碳和氮含量在 0~10 cm 土层内分别为 800.5 和 74.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而在 0~20 cm 土层内含量分别为 475.4 和 63.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表层明显较高。本研究结果与之基本一致。姜培坤等^[27]研究发现, 不同林地土壤微生物生物量碳、氮的差异与凋落物分解过程、林下植被的代谢过程及其林木诱导形成的根际微生物区系不同有关。本研究表现为随着巨桉林密度的减小, 林下土壤微生物生物量碳氮含量随之增加。原因可能是林分密度越小, 郁闭度小, 林下草本层发育充分, 为微生物的活动提供了有利的环境条件, 增加了微生物的活性, 从而使密度较小的林分土壤微生物生物量碳氮含量较高。

3.2 密度对巨桉人工林土壤微生物熵的影响

本研究中, 各密度巨桉人工林土壤微生物熵年平均值分别为 2.38% (A1)、2.12% (A2)、2.54% (A3), 处于一些文献报道的 0.5%~5% 之间^[28], 表

明 A3 的土壤有机碳处于相对积累状态。Saggar 等^[29]研究发现, 土壤微生物熵比微生物量生物碳变化更明显。刘守龙等^[30]研究认为, 微生物熵的变化可以作为有机碳变化的早期指标。本研究结果表明, 同一密度林分的土壤微生物熵比土壤微生物生物量碳稳定, 但是能否将其作为巨桉林土壤有机碳变化的指标, 还应作进一步研究。需要指出的是, 本试验中 A3 人工林地土壤微生物熵显著高于 A1 和 A2, 其原因可能是 A3 的土壤有机碳含量较低, 从而导致土壤微生物熵较高。

3.3 巨桉人工林土壤微生物生物量碳氮与土壤养分含量的关系

本研究结果表明, 3 种密度巨桉林分的土壤微生物生物量碳、氮与土壤水分无显著相关关系, 说明在本研究的华西雨屏区巨桉人工林, 影响土壤微生物生物量的限制性因子不是土壤湿度。相关分析同时表明, 各密度巨桉林分土壤微生物生物量碳和氮与土壤有机碳、有效磷、速效钾、水解氮、pH 值均有显著的相关性, 且土壤微生物生物量碳氮含量都随着土壤有机碳含量的增加而增加。这与吴建国^[31]、刘淑霞^[32]、金发会^[33]、何友军^[19]、刘占锋^[17]、王利民等^[34]的相关研究结果一致。本研究中影响土壤微生物生物量碳氮含量的重要因素也可能是各密度巨桉林分凋落物量、根活性、细根生物量和相关微气象因子的不同, 其对微生物生物量碳氮的影响机制需进一步研究。

参考文献:

- [1] BATJES N H. The total C and N in soils of the world[J]. *European Journal Soil Science*, 1996, **47**(2): 151-163.
- [2] DUIKER S W, LAI R. Crop residue and tillage effects on carbon sequestration in a Luvisol in central Ohio[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, **52**(1): 73-81.
- [3] ZHANG CH L(张超兰), XU J M(徐建民). Effect of organic and inorganic fertilizer application on the bioindicators of soil quality[J]. *Journal of Guangxi Agricultural and Biological Science*(广西农业生物科学), 2004, **23**(1): 81-85(in Chinese).
- [4] JENKINSON D S, LADD J N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover in Paul, Soil Biochemistry[M]. Paul V. E. A. and Ladd J. N. (eds), Marcel Dekker, New York, 1981, 5: 415-471.
- [5] JIA G M, LIU B R, WANG G, et al. The microbial biomass and activity in soil with shrub *Caragana korshinskii* K plantation in the semi-arid loess plateau in China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, **46**(1): 6-10.
- [6] ZHOU J B, CHEN X L, ZHANG Y L, et al. Nitrogen released from different plant residues of the Loess Plateau and their additions on contents of microbial biomass carbon, nitrogen in soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(3): 123-128.
- [7] LIU SH(刘爽), WANG ZH K(王传宽). Spatio-temporal patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2010, **30**(12): 3 135-3 143(in Chinese).
- [8] HU Z D(胡宗达), LIU SH R(刘世荣), SHI Z M(史作民), et al. Variations of soil nitrogen and microbial biomass carbon and nitrogen of *Quercus aquifolioides* forest at different attitudes in Balangshan[J]. *Forest Research*(林业科学研究), 2012, **25**(3): 261-268(in Chinese).
- [9] WU J, BROOKES P C. The proportional mineralisation of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grassland soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(3): 507-515.
- [10] BENJAMIN TUMER L, ANDREW W B, PHILIP M H. Rapid estimation of microbial biomass in grassland soils by ultraviolet absor-

- bance [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(7): 913–919.
- [11] CLASSEN A T, OVERBY S T, HART S C, *et al.* Season mediates herbivore effects on litter and soil microbial abundance and activity in a semi-arid woodland[J]. *Plant and Soil*, 2007, **295**(1): 217–227.
- [12] BASTIDA F, BARBERAG G, GARCIA C, *et al.* Influence of orientation, vegetation and season on soil microbial and biochemical characteristics under semiarid conditions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, **38**(1): 62–70.
- [13] WANG G B(王国兵), RUAN H H(阮宏华), TANG Y F(唐燕飞), *et al.* Seasonal fluctuation of soil microbial biomass carbon in secondary oak forest and *Pinus taeda* plantation in north subtropical area of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2008, **19**(1): 37–42(in Chinese).
- [14] ZHONG Z K, MAKESSCHIN F. Differences of soil microbial biomass and nitrogen transformation under two forest types in central Germany[J]. *Plant and Soil*, 2006, **283**(1/2): 287–289(in Chinese).
- [15] YI ZH 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 Ecologica Sinica*(生态学报), 2003, **23**(8): 1 673–1 678(in Chinese).
- [16] LIU M Q(刘满强), HU F(胡峰), HE Y Q(何园球), *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass and its significance to indicate soil quality under different vegetations restored on degraded red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*(土壤学报), 2003, **40**(6): 937–944(in Chinese).
- [17] LIU ZH F(刘占锋), LIU G H(刘国华), FU B J(傅伯杰), *et al.* Dynamics of soil microbial biomass C, N along restoration chronosequences in pine plantations[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2007, **27**(3): 1 011–1 018(in Chinese).
- [18] LIU B R(刘秉儒). Changes in soil microbial biomass carbon and nitrogen under typical plant communities along an altitudinal gradient in east side of Helan Mountain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*(生态环境学报), 2010, **19**(4): 883–888(in Chinese).
- [19] HE Y J(何友军), WANG Q K(王清奎), WANG S L(王思龙), *et al.* Characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen and their relationships with soil nutrients in *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2006, **17**(12): 2 292–2 296(in Chinese).
- [20] YUAN H W(袁海伟), SU Y R(苏以荣), ZHENG H(郑华), *et al.* Distribution characteristics of soil organic carbon and nitrogen in peak-cluster depression landuse of Karst Region[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2007, **26**(10): 1 579–1 584(in Chinese).
- [21] YUAN Y(袁颖), FAN H B(樊后保), LIU W F(刘文飞), *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soil dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in a Chinese Fir Plantation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*(水土保持学报), 2012, **26**(2): 138–143(in Chinese).
- [22] TU L H(涂利华), HU T X(胡庭兴), HUANG L H(黄立华), *et al.* Response of soil respiration to simulated nitrogen deposition in *Pleiblastus amarus* forest, Rainy Area of Western China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*(植物生态学报), 2009, **33**(4): 728–738(in Chinese).
- [23] LU R K. Soil and Agro-Chemical Analytical Methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 296–338.
- [24] XIANG Y B(向元彬), HU T X(胡庭兴), ZHANG J(张健), *et al.* Study on soil respiration in *Eucalyptus grandis* plantations with different densities in Rainy Area of Western China[J]. *Journal of Natural Resources*(自然资源学报), 2011, **26**(1): 79–88(in Chinese).
- [25] XIAO F M(肖复明), FAN SH H(范少辉), WANG S L(汪思龙), *et al.* A study on the characteristics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in *Phyllostachy edulis* plantation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*(水土保持学报), 2008, **22**(6): 128–131(in Chinese).
- [26] XU Q F(徐秋芳), JIANG P K(姜培坤), DONG D Y(董敦义), *et al.* A study on dynamic changes of soil nutrients under *Phyllostachys pubescens* forest[J]. *Journal of Bamboo Research*(竹子研究汇刊), 2000, **19**(4): 46–49(in Chinese).
- [27] JIANG P K(姜培坤), XU Q F(徐秋芳), YU Y W(俞益武). Microbial biomass carbon as an indicator for evaluation of soil fertility[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*(浙江林学院学报), 2002, **19**(1): 17–19(in Chinese).
- [28] SPARRING G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of change in soil organic matter[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1992, **30**(2): 195–207.
- [29] SAGGAR S, YEATER G W, SHEPHERD T G. Cultivation effects on soil biological properties, microfauna and organic matter dynamics in Eutric Gleysol and Gleyic Luvisol soils in New Zealand[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, **58**(1): 55–68.
- [30] LIU SH L(刘守龙), SU Y R(苏以荣), HUANG D Y(黄道友), *et al.* Response of C_(mic)-to-C_(org) to Land Use and Fertilization in Subtropical Region of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*(中国农业科学), 2006, **39**(7): 1 411–1 418.
- [31] WU J G(吴建国), AI L(艾丽). Soil microbial activity and biomass C and N content in three typical ecosystems in Qilian Mountains, China[J]. *Journal of Plant Ecology*(植物生态学报), 2008, **32**(2): 465–476(in Chinese).
- [32] LIU SH X(刘淑霞), LIU J SH(刘景双), ZHAO M D(赵明东), *et al.* Relationship between active soil organic carbon, nutrient bioavailability and crop yield[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*(吉林农业大学学报), 2003, **25**(5): 539–543(in Chinese).
- [33] JIN F H(金发会), LI SH Q(李世清), LU H L(卢红玲), *et al.* Relationships of microbial biomass carbon and nitrogen with particle composition and nitrogen mineralization potential in calcareous soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2007, **18**(12): 2 739–2 746(in Chinese).
- [34] WANG L M(王利民), QIU SH L(秋珊珊), LIN X J(林新坚), *et al.* Sensitivity analysis and dynamics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and related parameters in red-yellow soil of tea garden with different fertilization practices[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2012, **32**(18): 5 930–5 936(in Chinese).