

杉木人工林土壤微生物生物量碳氮特征及其与土壤养分的关系*

何友军^{1,2,3,*} 王清奎² 汪思龙² 于小军²

(¹中南林业科技大学, 长沙 410004; ²湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南会同 418307; ³湖南省林业厅, 长沙 410007)

【摘要】 研究了湖南会同红壤区杉木人工林和常绿阔叶林土壤微生物量和养分状况。结果表明, 该区杉木人工林取代地带性常绿阔叶林和杉木连栽后, 土壤微生物碳、氮和土壤养分含量下降, 土壤严重退化。在 0~10 cm 土层内, 常绿阔叶林土壤微生物碳和氮含量为 800.5 和 84.5 mg·kg⁻¹, 分别是第 1 代杉木林的 1.90 和 1.03 倍、第 2 代杉木林的 2.16 和 1.27 倍; 在 10~20 cm 土层内, 常绿阔叶林土壤微生物碳和氮含量为 475.4 和 63.3 mg·kg⁻¹, 分别是第 1 代杉木纯林的 1.86、1.60 倍和第 2 代杉木林的 2.11 和 1.76 倍。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层内, 杉木人工林取代常绿阔叶林和杉木栽植代数增加后, 土壤全氮、全钾、铵态氮和速效钾含量均明显降低, 但差异并不显著。人工杉木林分组成单一, 其凋落物分解慢、归还养分数量少; 炼山等造成的表土流失是杉木人工林土壤微生物量和养分库退化的重要原因。土壤微生物碳与土壤全氮、铵态氮、全钾和速效钾含量呈极显著的正相关, 土壤微生物氮与土壤养分含量也达到极显著水平。

关键词 杉木人工林 常绿阔叶林 土壤微生物量 土壤肥力

文章编号 1001-9332(2006)12-2292-05 **中图分类号** S714.5 **文献标识码** A

Characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen and their relationships with soil nutrients in *Cunninghamia lanceolata* plantations. HE Youjun^{1,2,3}, WANG Qingkui², WANG Silong², YU Xiaojun² (¹Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; ²Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Huitong 418307, Hunan, China; ³Forestry Department of Hunan Province, Changsha 410007, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2006, 17(12): 2292 ~ 2296.

The study on the soil microbial biomass and nutrient status under native broadleaved forest and *Cunninghamia lanceolata* plantations at the Huitong National Research Station of Forest Ecosystem showed that after the native broadleaved forest was replaced by mono-cultured *C. lanceolata* or *C. lanceolata* was planted continuously, soil microbial biomass and nutrient pool decreased greatly. In 0~10 cm soil layer, the concentrations of soil microbial carbon and nitrogen in broadleaved forest were 800.5 and 84.5 mg·kg⁻¹, being 1.90 and 1.03 times as much as those in the first rotation of *C. lanceolata* plantation, and 2.16 and 1.27 times as much as those in the second rotation of the plantation, respectively, while in 10~20 cm soil layer, the microbial carbon and nitrogen in broadleaved forest were 475.4 and 63.3 mg·kg⁻¹, being 1.86 and 1.60 times as much as those in the first rotation, and 2.11 and 1.76 times as much as those in the second rotation, respectively. Soil nutrient pools such as total nitrogen, total potassium, NH₄⁺-N, and available potassium also declined after the *C. lanceolata* plantation replaced native broadleaved forest, or *C. lanceolata* was planted continuously. Less litter and its slower decay rate in pure *C. lanceolata* plantation were the crucial factors leading to the decrease of soil microbial biomass and nutrient pool in this area, and human disturbance, especially slash-burning and site preparation, was the another factor leading to the decrease. There were significant positive correlations between soil microbial carbon and nitrogen and soil nutrients. To improve soil quality and maintain sustainable productivity, some measures including planting mixed conifer with hardwood, preserving residues after harvest, and adopting scientific site preparation should be taken.

Key words *Cunninghamia lanceolata* plantation, Evergreen broadleaved forest, Soil microbial biomass, Soil fertility.

1 引 言

土壤微生物量是土壤有机质和土壤养分转化与循环的动力,可作为土壤中植物有效养分的储备库,约占土壤有机质的 1%~3%^[11]。国内外学者已对

土壤微生物量碳作为评价土壤肥力的生物指标的可行性进行了大量的研究^[10,12,13,20,22]。业已证明,土壤

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-418)和国家自然科学基金资助项目(30470303)。

** 通讯联系人。E-mail:hyjhj@126.com
2006-03-13 收稿,2006-10-10 接受。

微生物碳与土壤养分存在正相关性,与生态系统的初级生产力以及土壤健康密切相关.土壤微生物量对管理措施的变化具有极高的敏感性,可以作为土壤总有机质变化的早期预测指标^[7,8].杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国特有的优良速生针叶树种,现有人工林面积约 $1.21 \times 10^7 \text{ hm}^2$,约占我国人工林面积的 24%^[3].随着杉木取代常绿阔叶林和杉木纯林连栽,林地土壤肥力下降,已严重影响和限制了杉木人工林的生产力及可持续发展^[4].目前,有关杉木人工林土壤微生物量的研究报道较少^[12,24,26].为此,本文在杉木的中心产区湖南省会同县,研究了第 1 代、第 2 代杉木纯林和常绿阔叶林土壤微生物碳、氮和土壤养分的变化,探讨微生物量对土壤养分循环和周转的影响,以及微生物量作为森林土壤质量评价指标的可行性,以期对杉木人工林的可持续利用提供科学依据.

2 材料与方法

2.1 自然概况

试验地设在湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站(110°08'E,27°09'N),海拔 200~500 m,为低山丘陵地貌类型.气候属亚热带湿润气候,年均温度 16.5℃,年均降雨量约 1 200 mm,年平均相对湿度 80%.土壤为山地红壤.地带性植被为典型的亚热带常绿阔叶林,主要组成树种为栲树(*Castanopsis fargesii*)、刨花润楠(*Machilus pauhoi*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)和石栎(*Lithocarpus glaber*)等,胸径大于 5 cm 的林木为 $1 124 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均胸径和树高为 22.2 cm 和 14.0 m.第 1 代杉木纯林为 1982 年常绿阔叶林皆伐后,经过炼山和全垦整地方式于 1983 年栽植的杉木纯林,密度为 $2 000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$;第 2 代杉木纯林为 1982 年第 1 代杉木纯林皆伐后,经过炼山和全垦整地方式于 1983 年栽植的杉木纯林,密度为 $2 000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$.

2.2 研究方法

试验所用土壤取自第 1 代杉木纯林、第 2 代杉木纯林和常绿阔叶林,3 种林分林地基本概况见表 1.土壤 0~10 cm 和 10~20 cm 分两层取样.具体采样方法:每一林地选择 3 个具有代表性的地段,面积为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,在每块样地内随

表 1 林地基本概况及其土壤理化性质

Table 1 General information and physical and chemical properties of soil in different forest stands

林地 Forest stand	林龄 Age (yr)	海拔 Elevation (m)	坡向 Aspect	坡度 Slope (°)	有机碳 SOC ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	C/N	pH (H_2O)	容重 Bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
CK	41	391	东北 NE	30	39.20	14.73	4.66	1.14
FCF	21	521	东北 NE	20	37.80	19.20	4.43	1.16
SCF	21	521	北 N	25	24.69	15.61	4.73	1.20

CK:常绿阔叶林 Evergreen broadleaved forest; FCF:第 1 代杉木林 First rotation of plantation *C. lanceolata*; SCF:第 2 代杉木林 Second rotation of plantation *C. lanceolata*. 下同 The same below.

机选取 10 个点,去除地表的凋落物层,然后用直径为 4.5 cm 的取土钻进行采样,相同土层的土壤组成一个混合土样,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℃左右,不超过 4 d)供测定土壤微生物量;另一部分土壤风干后过筛,供测定土壤养分等.土壤微生物量采用氯仿熏蒸浸提法^[23],浸提液中的有机碳和氮以及土壤有机碳均用德国产 Elementar High TOC II + N 分析仪测定,土壤养分等指标采用常规分析方法测定.

2.3 数据处理与分析

根据野外调查资料和实验室内的分析资料,用 Excel 图表处理软件和 SPSS(11.5)统计分析软件进行数据处理分析.

3 结果与分析

3.1 杉木人工林土壤微生物碳和氮

由表 2 可以看出,在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层内,杉木纯林土壤微生物碳、氮含量均低于常绿阔叶林(CK)土壤,第 1 代杉木纯林高于第 2 代杉木纯林.在 0~10 cm 土层,第 1 代杉木纯林和第 2 代杉木纯林土壤微生物碳含量分别是常绿阔叶林土壤的 52.7% 和 46.3%,土壤微生物氮含量分别为常绿阔叶林土壤的 96.9% 和 78.6%;在 10~20 cm 土层,第 1 代、第 2 代杉木纯林土壤微生物碳含量分别是常绿阔叶林土壤的 53.9% 和 47.5%,土壤微生物氮含量分别为常绿阔叶林土壤的 62.5%、57.0%.在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层内,3 种林地土壤微生物碳含量的差异性都达到了显著水平.随着土壤深度

表 2 不同林地土壤微生物量和土壤养分含量

Table 2 Content of soil microbial biomass and nutrients under different forests ($\pm \text{SD}$)

土层 Soil layer (cm)	林地类型 Forest stand	微生物碳 MBC ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	微生物碳/ 有机碳 MBC/SOC (%)	微生物氮 MBN ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 TN ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾 TK ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 AK ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0~10	CK	800.5 \pm 43.7a	2.05 \pm 0.08a	84.5 \pm 8.5a	2.66 \pm 0.80a	35.8 \pm 1.2a	17.0 \pm 1.8a	215.8 \pm 7.8a
	FCF	421.7 \pm 19.7b	1.13 \pm 0.17b	81.9 \pm 2.6a	1.97 \pm 0.40a	33.7 \pm 0.7a	12.1 \pm 4.3a	218.0 \pm 27.9a
	SCF	370.9 \pm 4.9bc	1.50 \pm 0.03c	66.4 \pm 7.0ab	1.58 \pm 0.22a	22.9 \pm 0.1b	9.4 \pm 5.0a	175.6 \pm 43.4a
10~20	CK	475.1 \pm 17.7a		63.2 \pm 2.0a	2.08 \pm 0.23a	35.2 \pm 3.6a	13.2 \pm 3.2a	172.3 \pm 34.3a
	FCF	256.0 \pm 12.6b		39.5 \pm 2.9b	1.62 \pm 0.45a	25.9 \pm 5.0ab	9.7 \pm 1.7a	143.3 \pm 38.9a
	SCF	225.8 \pm 8.9bc		36.0 \pm 1.1b	1.63 \pm 0.39a	23.4 \pm 4.3ab	8.2 \pm 2.4a	109.9 \pm 25.1a

* 不同字母表示同一土层各指标差异显著($P < 0.05$) Different letters in the same column and soil layer presented significant difference at 0.05 level.

的增加,土壤微生物量含量降低.常绿阔叶林 10~20 cm 土层内土壤微生物碳含量比 0~10 cm 土层内低 40.6%,微生物氮低 25.3%;杉木林 10~20 cm 土层内土壤微生物碳、氮含量(平均值)分别是 0~10 cm 土层内的 61%和 50%. Xu 等^[26]的研究结果显示,阔叶林土壤微生物碳含量在 117~948 mg·kg⁻¹、杉木林为 65~402 mg·kg⁻¹,与本研究结果基本一致.姜培坤等^[12]的研究发现,常绿阔叶林土壤微生物量高于杉木人工林,认为造成不同林地土壤微生物碳的差异,与凋落物分解过程和林木诱导形成的根际微生物区系不同有关.

Behera 和 Sahani^[1]发现桉树人工林土壤微生物量和活性低于天然林.本研究结果显示,杉木人工林土壤微生物 C/N 在 4.76~7.00 之间,平均为 5.87,常绿阔叶林土壤微生物 C/N 在 7.03~10.59 之间,平均为 8.49.这说明针叶林土壤微生物 C/N 低于阔叶林土壤.已有研究证实真菌的 C/N(7~12)高于细菌(3~6)^[15].因此,与常绿阔叶林相比,杉木人工林土壤微生物 C/N 降低是由于土壤微生物区系组成不同,如细菌数量增加,真菌数量减少.

土壤微生物碳与有机碳的比值(MBC/SOC)也称为土壤微生物熵,可以用来表示土壤过程或土壤质量的变化、预测土壤有机质长期变化或监测土壤退化及恢复情况^[9].因此,许多学者认为这个微生物学指标对土壤管理是极其有用的.由表 2 可以看出,土壤微生物碳/有机碳为 1.13%~2.05%,且杉木人工林显著低于常绿阔叶林. Xu 等^[26]的研究结果也证实,阔叶林中土壤微生物碳占有有机碳的比例(2.27%)高于杉木人工林(1.52%).

3.2 杉木人工林土壤养分

在杉木纯林生长和发育过程中,土壤大量养分被消耗,土壤中有效养分的含量随纯林连栽次数的增加而减少.应金花^[30]发现,第 2 代杉木人工林土壤水解氮、速效磷和速效钾含量分别比第 1 代下降了 34.8%、60.4%和 39.8%,且差异达到了极显著水平.随栽植代数的增加,与 1 代杉木林地相比,第 2 代和第 3 代杉木林地全氮含量分别下降 13.40%和 20.86%,全磷含量分别下降 22.81%和 36.84%,全钾含量分别下降 4.5%和 15.10%^[16].孙启武等^[21]的研究结果也证明,杉木连栽导致土壤养分含量下降.本研究结果表明,杉木人工林土壤养分含量低于常绿阔叶林,且第 2 代杉木纯林低于第 1 代杉木纯林,但差异不显著($P > 0.05$).在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,土壤全钾含量差异性达到了显著

水平($P < 0.05$),而全氮、铵态氮和速效钾均未达到显著水平.这说明随杉木连栽,土壤供肥能力下降.杉木林取代杂木林后,土壤全氮含量呈逐代下降的趋势.与第 1 代杉木林相比,第 2 代和第 3 代杉木林表层土壤全氮含量分别下降 7.84%和 18.63%,全钾含量分别下降 15.57%和 18.10%,水解性氮含量分别下降 1.79%和 15.44%,速效磷含量分别下降 6.67%和 20.00%,速效钾含量均下降 2.00%^[27].本研究也证实了这一结论.由于杉木凋落物的质量差(如 C/N 比较高)、短轮伐期和凋落物处理方式等不恰当的经营管理措施,使土壤养分归还较少,造成土壤养分缺乏.汪思龙等^[25]研究了杉木纯林及其与火力楠混交林土壤养分归还情况,发现混交林土壤养分归还量远远高于杉木纯林,其土壤中全氮、铵态氮和有效钾含量分别是杉木纯林的 1.64、1.82 和 1.63 倍.1 代杉木林凋落物营养元素年归还总量分别是 2 代和 3 代的 1.56 和 1.13 倍^[29].随着杉木连续栽植代数增加,林分郁闭度降低,林下植被大量生长,从而林下植被年凋落量增加.因此,林下植被的数量和质量及分解状况对杉木林地地力维护起重要作用.杉木林土壤养分的匮乏还与土壤流失有关.随杉木林取代杂木林及杉木连栽代数增加,土壤抗蚀性减弱,水土流失加重^[28].

3.3 土壤微生物量与土壤养分的相关性

土壤微生物一方面对土壤有机物质起分解作用,使有机物质转化成有效养分,另一方面,对土壤中的无机营养元素起固持和保蓄作用,微生物量越大,土壤保肥作用越强,并使土壤养分趋于积累.因此,土壤微生物量是植物矿质养分的源和汇,是稳定态养分转变为有效态养分的催化剂^[2,6].已有研究表明,土壤微生物量库的微小变化都会影响到养分的循环和有效性^[17].本研究结果表明,土壤微生物碳含量与土壤全氮、铵态氮、全钾和速效钾含量间呈极显著正相关($P < 0.01$)(图 1).微生物氮与土壤全氮、铵态氮、全钾和速效钾含量间也达到极显著相关(图 1).Smith 等^[18]认为,微生物 N、P、S 与土壤有效 N、P、S 之间存在着某种动态平衡;刘淑霞等^[14]的研究结果显示,土壤微生物碳与土壤碱解氮的相关性较弱($R^2 = 0.188, n = 16$),与速效磷存在正相关,但不显著($R^2 = 0.312, n = 16$),与速效钾的相关性也不显著($R^2 = 0.428, n = 16$).这说明土壤生物碳指示土壤肥力动态变化比土壤有机碳更加灵敏,可以用来反映土壤肥力的动态变化^[5,11].因此,土壤微生物碳可以作为林地土壤肥力指标.

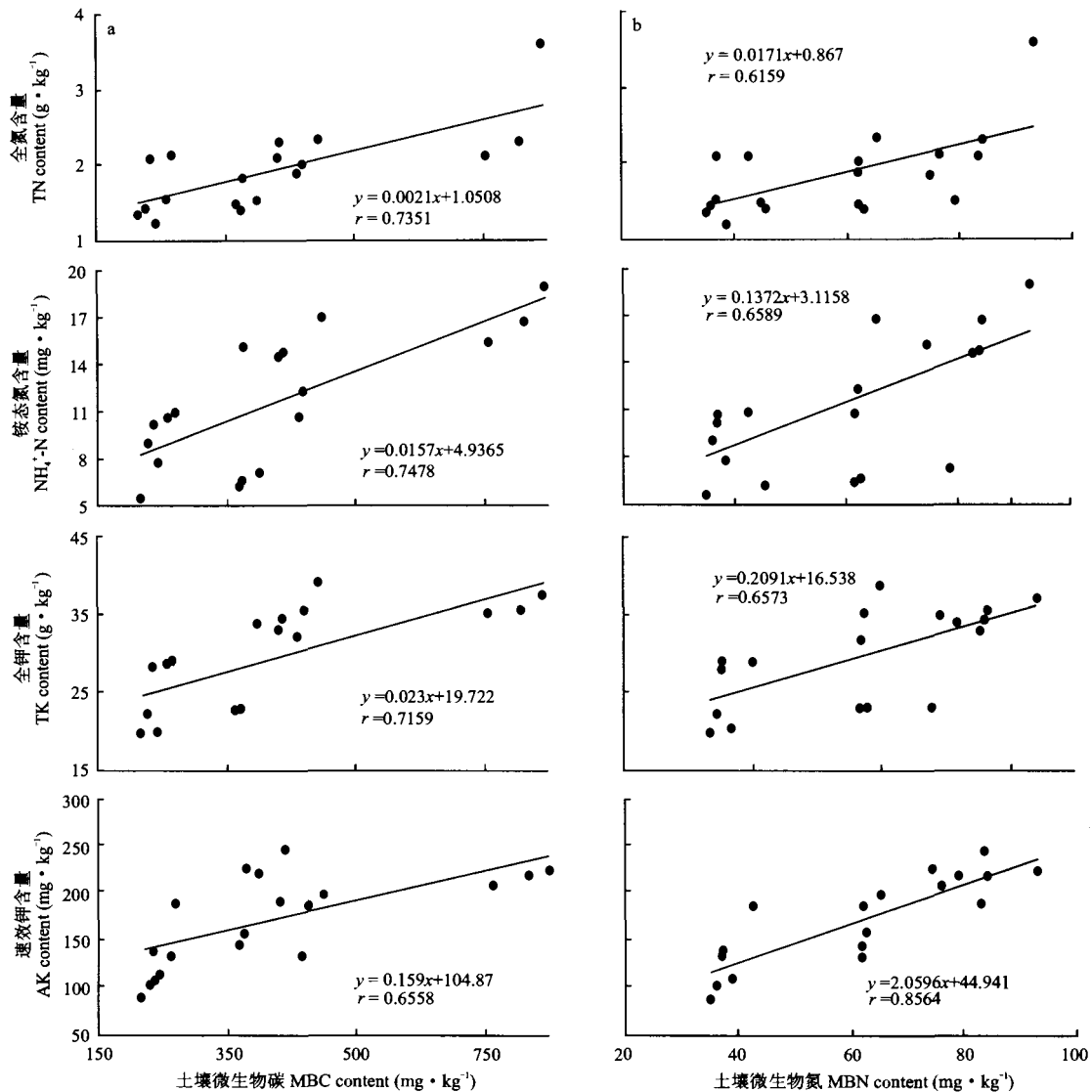


图1 土壤微生物碳(a)、氮(b)与土壤养分的关系

Fig. 1 Relationships of soil microbial biomass carbon(a), nitrogen (b) and nutrients.

4 结 论

与常绿阔叶林相比,杉木人工林土壤微生物碳、氮含量、土壤微生物熵和土壤养分含量均明显降低,第2代杉木纯林低于第1代杉木纯林。

土壤微生物碳与土壤全氮、全钾、铵态氮和速效钾呈极显著正相关;土壤微生物氮也与土壤养分具有极显著的正相关性。因此,土壤微生物碳和氮可以作为评价杉木人工林土壤质量的一个重要生物指标。

参考文献

- 1 Behera N, Sahani U. 2003. Soil microbial biomass and activity in response to *Eucalyptus* plantation and natural regeneration on tropical soil. *For Ecol Manage*, **174**: 1 ~ 11
- 2 Carter MR, Rennie DA. 1984. Dynamics of soil microbial biomass N under zero and shallow tillage for spring wheat, using ¹⁵N urea. *Plant Soil*, **76**: 157 ~ 164
- 3 Chen C-Y (陈楚莹), Wang S-L (汪思龙). 2004. Ecology of Mixed Plantation Forest. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 4 Chen C-Y (陈楚莹), Zhang J-W (张家武), Zhou C-L (周崇莲), et al. 1990. Researches on improving the quality of forest land and the productivity of artificial *Cunninghamia lanceolata* stands. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **1**(2): 97 ~ 106 (in Chinese)
- 5 Chen G-C (陈国潮), He Z-L (何振立). 1998. Study on microbial biomass of red soil under different land use. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), **29**(6): 276 ~ 278 (in Chinese)
- 6 Coleman DC, Reid CPP, Cole CV. 1983. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems. *Adv Ecol Res*, **13**: 51 ~ 55
- 7 Dalal RC, Henderson PA, Guasby JM. 1991. Organic matter and microbial biomass in a Vertisol after 20 years of zero-tillage. *Soil Biol Biochem*, **23**: 435 ~ 441
- 8 Gregorich EG, Carter MR, Angers DA, et al. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can J Soil Sci*, **74**: 376 ~ 385
- 9 Hart PBS, August JA, West AW. 1989. Long-term consequences of

- topsoil mining on select biological and physical characteristics of two Zealand loessial soils under grazed pasture. *Land Degrad Rehab*, **1**: 77 ~ 88
- 10 Huang Y (黄宇), Wang S-L (汪思龙), Feng Z-W (冯宗炜), et al. 2004. Soil quality assessment of forest stand in different plantation ecosystems. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **15**(12): 2199 ~ 2205 (in Chinese)
 - 11 Jenkinson DS, Ladd JN. 1981. Microbial biomass in soil: Measurement and turnover. In: Paul EA, Ladd JN, eds. *Soil Biochemistry*. Marcel New York: Dekker Inc. 415 ~ 458
 - 12 Jiang P-K (姜培坤), Xu Q-F (徐秋芳), Yu Y-W (俞益武). 2002. Microbial biomass carbon as an indicator for evaluation of soil fertility. *J Zhejiang For Coll (浙江林学院学报)*, **19**(1): 17 ~ 19 (in Chinese)
 - 13 Li S-F (李淑芬), Yu Y-C (俞元春), He S (何晟). 2003. Correlation between dissolved organic carbon and soil factors of the forest soil in southern China. *J Zhejiang For Coll (浙江林学院学报)*, **20**(2): 119 ~ 123 (in Chinese)
 - 14 Liu S-X (刘淑霞), Liu J-S (刘景双), Zhao M-D (赵明东), et al. 2003. Relationship between active soil organic carbon, nutrient bioavailability and crop yield. *J Jilin Agric Univ (吉林农业大学学报)*, **25**(5): 539 ~ 543 (in Chinese)
 - 15 Marumoto T, Anderson JPE, Domsch LH. 1982. Decomposition of ¹⁴C and ¹⁵N-labelled microbial cells in soil. *Soil Biol Biochem*, **14**: 461 ~ 467
 - 16 Ma X-Q (马祥庆), Fan S-H (范少辉), Liu A-Q (刘爱琴), et al. 2000. A comparison on soil fertilities of Chinese fir plantations of different generations. *For Res (林业科学研究)*, **13**(6): 577 ~ 582 (in Chinese)
 - 17 Roy S, Sigh JS. 1994. Consequences of habitat heterogeneity for availability of nutrients in a dry tropical forest. *J Ecol*, **82**: 503 ~ 509
 - 18 Smith JL, Paul EA. 1991. The significance of soil microbial biomass estimations. In: Jean-Marc B, Stotzky G, eds. *Soil Biochemistry*. Vol. 6. New York: Marcel Dekker Inc.
 - 19 Sparling GP. 1992. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Aust J Soil Res*, **30**: 195 ~ 207
 - 20 Sun B (孙波), Zhang T-L (张桃林), Zhao Q-G (赵其国). 1999. Fertility evolution of soil derived from quaternary red clay in low-hilly region in middle subtropics II. Evolution of soil chemical and biological fertilities. *Acta Pedol Sin (土壤学报)*, **36**(2): 203 ~ 217 (in Chinese)
 - 21 Sun Q-W (孙启武), Yang C-D (杨承栋), Jiao R-Z (焦如珍). 2003. The changes of soil properties of the successive Chinese fir plantation in Dagang Mountain of Jiangxi Province. *Sci Silvae Sin (林业科学)*, **39**(3): 1 ~ 5 (in Chinese)
 - 22 Van Bruggen AHC, Semenov AM. 2000. In search of biological indicators for soil health and disease suppression. *Appl Soil Ecol*, **15**: 13 ~ 24
 - 23 Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biol Biochem*, **19**: 703 ~ 707
 - 24 Wang Q-K (王清奎), Wang S-L (汪思龙), Gao H (高洪), et al. 2005. Dynamics of soil active organic matter in Chinese fir plantations. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **16**(7): 1270 ~ 1274 (in Chinese)
 - 25 Wang S-L (汪思龙), Liao L-P (廖利平), Ma Y-Q (马越强). 1997. Nutrient return and productivity of mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* plantations. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **8**(4): 347 ~ 352 (in Chinese)
 - 26 Xu QF, Xu JM. 2003. Changes in soil carbon pools induced by substitution of plantation for native forest. *Pedosphere*, **13**: 271 ~ 278
 - 27 Yang Y-S (杨玉盛), Chen G-S (陈光水), Huang B-L (黄宝龙). 2000. Variation in soil water and nutrients between different rotation stands of Chinese fir. *J Nanjing For Univ (南京林业大学学报)*, **24**(2): 25 ~ 28 (in Chinese)
 - 28 Yang Y-S (杨玉盛), Chen G-S (陈光水), Peng J-C (彭加才), et al. 1999. The changes in soil antierodibility in different Chinese fir rotations. *J Mount Sci (山地学报)*, **17**(2): 163 ~ 167 (in Chinese)
 - 29 Yang Y-S (杨玉盛), Qiu R-H (邱仁辉), He Z-M (何宗明), et al. 1998. Studies on the stand net productivity and biological cycle of nutrient elements in the 29-year-old plantations of Chinese fir on different rotations. *Sci Silvae Sin (林业科学)*, **34**(6): 3 ~ 11 (in Chinese)
 - 30 Ying J-H (应金花). 1997. Comparative study on the growth and soil properties under different successive rotation of Chinese fir. *J Jiangsu For Sci Technol (江苏林业科技)*, **24**(1): 31 ~ 43 (in Chinese)
-
- 作者简介** 何友军,男,1962年生,高级工程师,湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站客座研究员.主要从事森林培育、防护林经营与管理方面的研究工作,发表论文20余篇. Tel:0731-5550913; E-mail: hyjhyj@126.com.
- 责任编辑** 李凤琴