

马尾松天然林土壤碳氮磷含量与碳密度的关系

潘 鹏^{1,2}, 甘文峰³, 欧阳勋志^{1*}, 肖 欣¹

(1. 江西农业大学 林学院, 江西 南昌 330045; 2. 上饶市森林资源监测中心, 江西 上饶 334000;
3. 安福县明月山林场, 江西 吉安 343200)

摘 要:基于江西中部马尾松天然林不同生长阶段土壤性质测定,探讨其不同林龄土壤碳密度及其垂直分布规律,分析不同土层土壤有机碳密度与土壤碳氮磷含量之间的关系。结果表明:各龄组土壤有机碳和全氮含量均随土层的加深而降低,且表层(0~10 cm)含量显著高于其他各层,各土层间全磷含量无显著性差异;土壤有机碳密度整体上呈随土层深度的增加而降低的趋势,平均有机碳密度为 $10.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,主要分布在 0~50 cm;土壤有机碳密度与土壤碳氮磷含量之间相关性在表层均达显著水平($p<0.05$)。

关键词:马尾松天然林;林龄;土壤碳氮磷;有机碳密度

中图分类号:S714.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2014)06-0001-05

Relationship between the Contents of Soil Organic Carbon, Total Nitrogen, Total Phosphorus and Soil Organic Carbon Density of *Pinus massoniana* Nature Forest

PAN Peng^{1,2}, GAN Wen-feng³, OUYANG Xun-zhi^{1*}, XIAO Xin¹

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China;
2. Forest Resources Monitoring Center in Shangrao City, Shangrao, Jiangxi 334000, China;
3. Anfu County Mingyue Mountain Forestry Centre, Jian, Jiangxi 343200, China)

Abstract: This paper mainly discussed soil organic carbon density and vertical distribution in different age groups, analyzed the relationship between soil organic carbon density and contents of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus at different soil layers based on the determination of soil properties of nature *Pinus massoniana* forest in central Jiangxi Province. The results showed that with the increase of soil depth, the organic carbon content and total nitrogen content decreased in all age groups, and the contents of organic carbon and total nitrogen in topsoil (0—10 cm) were significantly higher than in other soil layers. There was no significant difference in the content of total phosphorus among 5 soil layers. With the increase of soil depth, the organic carbon density showed a decreasing tendency, with an average soil organic carbon density of $10.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, mainly distributed in 0—50 cm layer. Correlations between the soil organic carbon density and the organic carbon, total nitrogen and total phosphorus content were significantly different ($p<0.05$) in topsoil.

Key words: *Pinus massoniana* nature forest; stand age; soil organic carbon; total nitrogen; total phosphorus; organic carbon density

土壤是陆地生态系统重要组成部分,其有机碳储量的分布和转换在陆地碳循环中起着重要作用^[1]。研究表明,全球土壤碳库是陆地植被碳库的 2~3 倍,而森林生态系统为陆地生物圈的主体,维

收稿日期:2014-03-04 修回日期:2014-07-28
基金项目:中国科学院战略性先导科技专题(XDA05050205);国家自然科学基金项目(31160159,31360181)。
作者简介:潘鹏,男,硕士,研究方向:森林资源监测与管理。E-mail: panpeng243@126.com
* 通信作者:欧阳勋志,男,教授,博士生导师,研究方向:森林资源监测与管理。E-mail: oyxz_2003@hotmail.com

持着全球 73% 的土壤碳库^[2],土壤碳氮磷等养分元素在森林碳平衡过程中发挥重要作用^[3]。近年来,有关森林土壤碳氮磷和碳密度的研究较多,但多集中于 0~60 cm^[4-7],对于土壤深层(>60 cm)的研究不多^[8-9];另外,对比不同森林类型土壤的研究较多^[10-12],而对同一森林类型不同生长阶段土壤碳氮磷和碳密度的研究相对较少^[13-14]。马尾松(*Pinus massoniana*)林广泛分布于长江流域及其以南各省区,在长江中上游防护林体系中起着举足轻重的作用,截至目前,对于马尾松天然林不同生长阶段土壤碳氮磷及其碳密度的研究较少,尤其是他们之间相互关系的研究更是鲜有报道。本研究以马尾松天然林为研究对象,探讨其不同生长阶段土壤碳密度及其垂直分布规律,并分析其与碳氮磷含量间的关系,对掌握马尾松天然林土壤碳库分布特征有重要指导意义,可为评测其土壤碳密度在剖面垂直分布提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于江西中部的吉安市(113°46′—115°

56′ E,25°58′—27°57′ N),属亚热带季风气候区,为湿润气候。年平均气温为 17.7℃,年均降水量 1 553 mm,无霜期 279 d。境内主要植被类型有针叶林、针阔混交林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、竹林,其中针叶林以马尾松林和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林为主。马尾松天然林林下植被灌木以檫木(*Loropetalum chinense*)、金樱子(*Rosa laevigata*)、栀子(*Gardenia jasminoides*)为主,草本以铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、露籽草(*Ottochloa nodosa*)、莎草(*Cyperus iria*)为主。土壤类型主要为红壤,其他还有黄壤、黄棕壤等。

2 材料与方法

2.1 标准地选取

根据国家林业局《森林资源规划设计调查主要技术规定》(2003)中龄组划分标准,分别 5 个龄组选择母岩(花岗岩)、土壤类型(红壤)、坡向(阳坡)、坡位(中坡)相同及其他立地因子相近的马尾松天然林,每个龄组设置 3 个标准地,标准地面积为 0.08 hm²,共设置 15 个(表 1)。

表 1 标准地基本概况
Table 1 Basic situations of sample plots

林龄	平均 年龄/a	平均 胸径/cm	平均 树高/m	平均林分密度 (N·hm ⁻²)	灌木		草本	
					平均 盖度/%	平均 高度/cm	平均 盖度/%	平均 高度/cm
幼龄林	18	9.7	8.1	1 500	39	80	64	45
中龄林	22	10.5	8.7	1 463	68	135	46	35
近熟林	34	15.1	10.9	596	73	130	41	40
成熟林	45	17.5	14.3	642	67	130	48	40
过熟林	63	20.1	14.6	646	54	150	52	50

2.2 土样采集与测定

在每个标准地内挖取典型土壤剖面 1 个,同时在标准地内上坡和下坡用土钻法分 0~10、10~20、20~30、30~50 cm 与 50~100 cm 5 层取混合土样。土壤容重采用环刀法测定;有机碳采用重铬酸钾-外加热法测定;全氮采用靛酚蓝比色法测定;全磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定。

2.3 土壤有机碳密度计算

土壤有机碳密度(SOC)计算公式^[15]为:

$$SOC_i = \sum_{i=1}^n (C_i \times d_i \times D_i) / 100 \quad (1)$$

式中,*i*—土壤层次,SOC_{*i*}—土壤碳密度(kg·m⁻²),*C_i*—土壤有机碳含量(g·kg⁻¹),*d_i*—土壤容重(g·cm⁻³),*D_i*—土层深度(cm)。

2.4 数据处理

数据的分析、统计处理采用 Excel 2007、SPSS17.0。

3 结果与分析

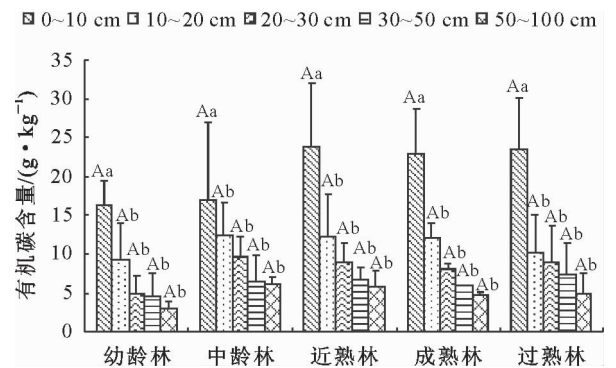
3.1 土壤有机碳含量

各龄组土壤有机碳含量均在表层(0~10 cm)最大,随土层的加深而逐渐降低,0~10 cm 到 10~20 cm 下降幅度最大,降幅最大为过熟林,达 56.75%;方差分析表明,各龄组土壤有机碳总量差异显著,LSD 法进一步分析显示,各龄组 0~10 cm 土壤有机碳含量显著高于其他各土层,其他各层土壤有机碳含量随土层变化较为平缓,差异不显著;各土层有机碳含量在不同龄组间均无显著性差异(图 1)。

3.2 土壤全氮含量

各龄组表层土壤全氮含量最高,介于 0.81~1.79 g·kg⁻¹之间,50~100 cm 土壤全氮含量最低,介于 0.37~0.63 g·kg⁻¹之间,土壤全氮含量随土层的加深而降低,0~10 cm 到 10~20 cm 下降幅度最大,为 16.07%~48.17%;方差分析表明,

各龄组土壤全氮总量差异显著,且随林龄的增加呈上升的趋势,LSD 法分析表明,各龄组土壤全氮含量在 0~10 cm 显著高于其他各土层,其他各层土壤有机碳含量随土层变化较为平缓,差异不显著;各土层不同龄组间土壤全氮含量差异性无明显规律(图 2)。



注:不同大写字母表示同一土层不同龄组存在显著性差异($p<0.05$),不同小写字母表示同一龄组不同土层存在显著性差异($p<0.05$),下同。

图 1 土壤有机碳含量

Fig. 1 Soil organic carbon content

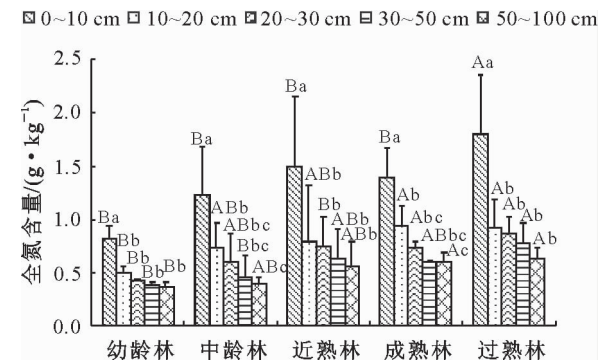


图 2 土壤全氮含量

Fig. 2 Soil total nitrogen content

3.3 土壤全磷含量

同一龄组各土层土壤全磷含量较为稳定,无明显变化规律,不同龄组全磷含量随林龄的增加而上升,近熟林后趋于稳定;方差分析表明,不同土层间土壤全磷含量均无显著性差异;各土层不同龄组间土壤全磷含量差异性无明显规律(图 3)。

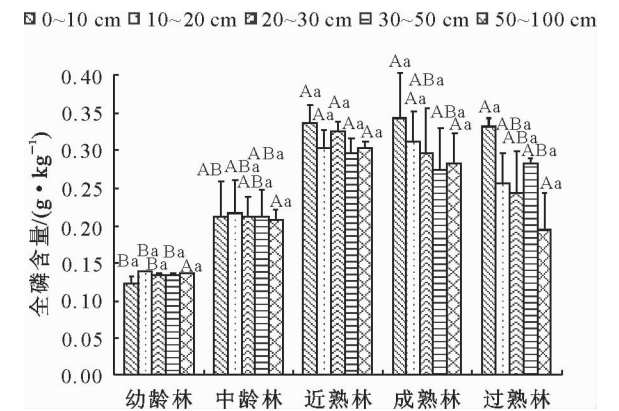


图 3 土壤全磷含量

Fig. 3 Soil total phosphorus content

3.4 土壤有机碳密度及其垂直分布

不同生长阶段土壤容重、有机碳含量空间分布存在很大差异,从而导致土壤有机碳密度也随之发生变化。根据公式(1)算出各龄组土壤有机碳密度(表 2),结果表明,不同龄组土壤有机碳密度差异较大,幼龄林最低为 $7.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,过熟林最高为 $11.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,同一龄组各土层间土壤有机碳密度差异无明显规律,各土层不同龄组间土壤有机碳密度均无显著性差异;但从土壤有机碳密度垂直分布(图 4)看出,不同龄组 0~30 cm 单位面积土壤有机碳储量占整个土层的比重介于 $41.3\% \sim 52.4\%$ 之间,0~50 cm 层比重介于 $59.31\% \sim 70.69\%$ 之间,可见,土壤有机碳主要储存在 0~50 cm。

表 2 土壤有机碳密度

Table 2 Soil organic carbon density

土壤层次/cm	kg · m ⁻²				
	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林
0~10	1.96(0.28)Aa	1.92(0.28)Ab	2.69(0.14)Aab	2.65(0.40)Ab	3.01(0.68)Aab
10~20	1.35(0.66)Aab	1.27(0.14)Ab	1.54(0.55)Abc	1.50(0.30)Acd	1.40(0.74)Aab
20~30	0.75(0.34)Ab	1.08(0.27)Ab	1.15(0.35)Ac	1.13(0.09)Ad	1.23(0.75)Ab
30~50	1.41(0.88)Aab	1.86(0.93)Ab	1.77(0.31)Abc	1.66(0.09)Ac	2.07(1.25)Aab
50~100	2.27(0.61)Aa	4.20(0.67)Aa	3.72(0.13)Aa	3.26(0.26)Aa	3.59(2.11)Aa
合计(0~100)	7.74	10.33	10.87	10.20	11.30

注:括号内数据为标准差;不同大写字母表示同一土层不同龄组存在显著性差异($p<0.05$),不同小写字母表示同一龄组不同土层存在显著性差异($p<0.05$)。

各龄组土壤有机碳密度均表现为 $50 \sim 100 \text{ cm} > 0 \sim 10 \text{ cm} > 30 \sim 50 \text{ cm} > 10 \sim 20 \text{ cm} > 20 \sim 30 \text{ cm}$ (表 2),由于划分土层厚度不一,因此不能表明不同土壤层次相同土层厚度下其土壤有机碳密度规律,土层每 10 cm 厚度的土壤平均有机碳密度(图 5)可

以看出,各龄组每 10 cm 厚度土壤有机碳密度均随着土层深度的增加而降低,其中 0~30 cm 间降低幅度较大,之后趋于平缓,而 0~10 cm 土层的有机碳密度在不同龄组之间表现为变化幅度较大,其他各土层不同龄组间变化幅度较小。

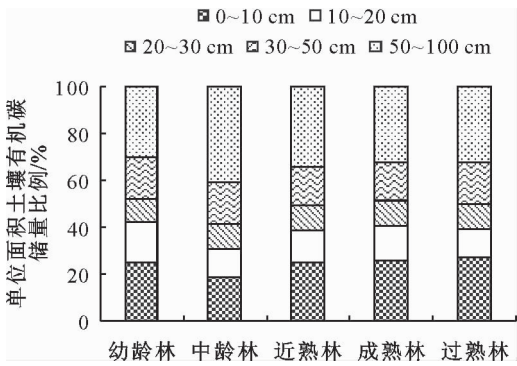


图 4 不同龄组土壤有机碳密度剖面分布

Fig. 4 Soil organic carbon density of different age groups at different profiles

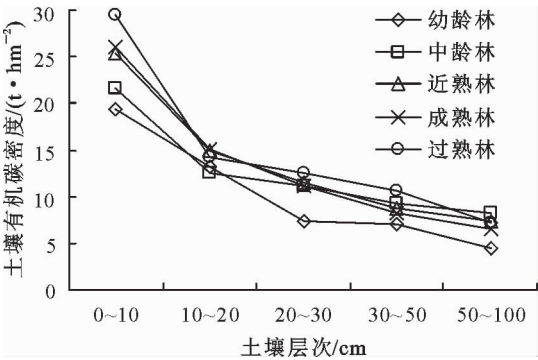


图 5 不同龄组土壤各层 10 cm 厚度平均有机碳密度

Fig. 5 Mean soil organic carbon density in 10 cm soil layer of different age groups

3.5 土壤有机碳密度与碳氮磷的关系

因不同龄组各土层土壤碳氮磷含量每组仅有 3 次重复数据,对其之间的相关关系分析代表性不强且规律不明显,故本文仅对不同土层(不分龄组)土壤有机碳密度与土壤碳氮磷之间的相关性进行分析。由于土壤容重值有一定范围,结合公式(1)可以看出土壤有机碳密度与有机碳含量之间相关性较大,相关性分析进一步得到验证(表 3);从表 3 可以看出,土壤有机碳密度与土壤全氮含量呈正相关,且相关性随土层深度增加而降低,两者在 0~10 cm 和 10~20 cm 层相关性达极显著水平($p<0.01$),20~30 cm 相关性达显著水平($p<0.05$),与土壤全磷含量在 0~10 cm 层显著正相关($p<0.05$),在其他各层均不显著($p>0.05$),且在 20~30 cm 和 50~100 cm 层呈负相关;有机碳和全氮含量在所有土层呈正相关,且相关性随土层深度增加而降低,两者在 0~30 cm 各层相关性均达极显著水平,30~50 cm 相关性达显著水平;有机碳和全磷含量在 0~10 cm 呈极显著正相关;全氮和全磷含量在所有土层呈正相关,且在 0~10 cm 达极显著水平。

表 3 土壤有机碳密度与碳氮磷含量关系

Table 3 Correlations among SOC density organic carbon, total nitrogen and total phosphorus content

土层/cm	项目	变量		
		碳密度	有机碳	全氮
0~10	有机碳	0.85 **		
	全氮	0.65 **	0.81 **	
	全磷	0.59 *	0.68 **	0.70 **
10~20	有机碳	0.97 **		
	全氮	0.65 **	0.70 **	
	全磷	0.05	0.20	0.42
20~30	有机碳	0.97 **		
	全氮	0.58 *	0.64 *	
	全磷	-0.28	0.07	0.38
30~50	有机碳	0.99 **		
	全氮	0.45	0.52 *	
	全磷	0.27	0.34	0.58
50~100	有机碳	0.97 **		
	全氮	0.18	0.25	
	全磷	-0.22	-0.11	0.42

注: ** 表示极显著相关($p<0.01$), * 表示显著相关($p<0.05$)。

4 结论与讨论

土壤有机碳和全氮含量均表现随土层深度的增加而降低,两者含量均主要集中在土壤 0~30 cm,有机碳含量表层土显著高于其他各层,全氮含量表层土与其他各层有显著性差异;主要原因在于植被、凋落物和腐殖质对土壤有机碳和全氮含量贡献最大,这些主要作用于表层土,随土层深度的加深而减弱,而土壤全磷含量主要是与土壤类型、成土母质等因素有关^[16],故全磷含量与土层无显著性差异。

土壤有机碳密度整体上呈现随土层深度的增加而降低的趋势,平均碳密度为 $10.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,略小于报道的我国针叶林土壤平均碳密度($11.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[17],这主要由于亚热带地区全年气温较高,降雨量充沛,有机物质代谢较快,不利于土壤有机碳的积累^[18]。就整个土层碳密度而言,0~30 cm 和 0~50 cm 所占比例平均为 48.99%和 66.40%,与 N. H. Baties^[19] 关于土壤碳密度研究结果(49%和 67%)一致。

各变量相关性均在表层土达显著水平($p<0.05$),这主要是由于凋落物和腐殖质对土壤表层土壤养分贡献较大,50~100 cm 均表现相关性不显著($p>0.05$),且有机碳和全磷含量呈负相关,可能是由于 50~100 cm 有机碳、全氮和全磷含量极低所导致;土壤有机碳密度与土壤有机碳含量和全氮含量相关性较高;由于 95%以上土壤氮以有机态形式存在^[20],故而有机碳和全氮含量相关性密切,并随土层的加深相关性逐渐减弱;潘忠松^[21]等对黔南马尾松人工林土壤有机碳的研究表明土壤有机碳密度与

土壤全磷含量呈正相关关系,本研究中土壤有机碳密度与土壤全磷含量在 20~30 cm 和 50~100 cm 层呈负相关关系,且除表层土外全磷含量与有机碳和全氮含量相关性均不高,这可能是由于赣中酸性红壤地区缺磷,全磷含量偏低所致。

土壤相关理化性质、微生物及酶活性等均对有机碳密度有显著影响^[22-25],本研究仅对土壤有机碳密度与碳氮磷含量之间进行了相关性比较,对于马尾松天然林土壤有机碳密度与土壤理化及生物学性质的综合分析有待进一步研究。

参考文献:

[1] 苏永中,赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228.
SU Y Z, ZHAO H L. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects [J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(3): 220-228. (in Chinese)

[2] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, *et al.* Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.

[3] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.

[4] 王海燕,雷相东,张会儒,等. 近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(3): 11-16.
WANG H Y, LEI X D, ZHANG H R, *et al.* Soil organic carbon in semi-natural mixed larch-spruce-fir stands of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(3): 11-16. (in Chinese)

[5] 刘延惠,王彦辉,于澎涛,等. 六盘山南部华北落叶松人工林土壤有机碳含量[J]. 林业科学, 2012, 48(12): 1-9.
LIU Y H, WANG Y H, YU P T, *et al.* Soil organic carbon contents of *Larix principis-rupprechtii* plantations in the southern part of Liupan Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(12): 1-9. (in Chinese)

[6] 王海燕,张洪江,杨平,等. 不同水土保持林土壤有机碳研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(5): 535-539.
WANG H Y, ZHANG H J, YANG P, *et al.* Soil organic carbon under different forests for water and soil conservation[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(5): 535-539. (in Chinese)

[7] 于洋,王海燕,雷相东,等. 东北过伐林区蒙古栎天然林土壤有机碳研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 57-62.
YU Y, WANG H Y, LEI X D, *et al.* Soil organic carbon in over-logged forest stands of *Quercus mongolica* in northeastern China[J]. Journal of Northwest Forest University, 2011, 26(2): 57-62. (in Chinese)

[8] 张景,蒋新革,何介南,等. 森林土壤有机碳含量与不同形态氮含量的相关性[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(7): 114-118.
ZHANG J, JIANG X G, HE J N, *et al.* Relationship between

forest soil organic carbon content and nitrogen content with different forms[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(7): 114-118. (in Chinese)

[9] 王晓芳,张景群,王蕾,等. 黄土高原油松人工林幼林生态系统碳汇研究[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(5): 29-32.
WANG X F, ZHANG J Q, WANG L, *et al.* Analysis of carbon sink in artificial forest ecosystem of young *Pinus tabulaeformis* plantation in Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forest University, 2010, 25(5): 29-32. (in Chinese)

[10] 常宗强,冯起,司建华,等. 祁连山不同植被类型土壤碳储量和碳通量[J]. 生态学杂志, 2008, 27(5): 681-688.
CHANG Z Q, FENG Q, SI J H, *et al.* Soil carbon storage and CO₂ flux under different vegetation types in Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(5): 681-688. (in Chinese)

[11] 王超,杨智杰,黄蓉,等. 中亚热带人工经济林土壤有机碳含量及分布[J]. 亚热带及资源环境学报, 2011, 6(2): 36-41.
WANG C, YANG Z J, HUANG R, *et al.* Content and distribution of soil organic carbon in economic plantation of mid-subtropical China[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2011, 6(2): 36-41. (in Chinese)

[12] 王宁,王百田,王瑞君,等. 山西中部主要森林植被类型土壤碳密度研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 858-862.
WANG N, WANG B T, WANG R J, *et al.* Study on soil carbon density under some main forest types in the central part of Shanxi province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(4): 858-862. (in Chinese)

[13] 吴志祥,谢贵水,陶忠良,等. 不同树龄橡胶树林地土壤有机碳含量与碳储量特征[J]. 热带作物学报, 2009, 30(2): 135-141.
WU Z X, XIE G S, TAO Z L, *et al.* Characteristics of soil organic carbon in rubber plantations at different ages[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2009, 30(2): 135-141. (in Chinese)

[14] 葛晓改,肖文发,曾立雄,等. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 852-862.
GE X G, XIAO W F, ZENG L X, *et al.* Relationships between litter substrate quality and soil nutrients in different-aged *Pinus massoniana* stands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 852-862. (in Chinese)

[15] 吴亚丛,李正才,程彩芳,等. 林下植被抚育对樟人工林生态系统碳储量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(2): 142-149.
WU Y C, LI Z C, CHENG C F, *et al.* Effects of understory removal on forest carbon storage in *Cinnamomum camphora* plantation ecosystem[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(2): 142-149. (in Chinese)

[16] 和继军,蔡强国,田磊,等. 植被措施对土壤保育的作用及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 706-710.
HE J J, CAI Q G, TIAN L, *et al.* Effect of vegetation measures on the soil conservation and factors analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 706-710. (in Chinese)

Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2):245-251. (in Chinese)

[32] 潘冬荣, 柳小妮, 申国珍, 等. 神农架不同海拔典型森林凋落物的分解特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12):3361-3366.

PAN D R, LIU X N, SHEN G Z, *et al.* Litter decomposition of typical forests along an altitude gradient in Mt. Shennongjia, Hubei, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(12):3361-3366. (in Chinese)

[33] HIROBE M, SABANG J, BHATTA B K, *et al.* Leaf-litter decomposition of 15 tree species in a lowland tropical rain forest in Sarawak:decomposition rates and initial litter chemistry [J]. Journal of Forest Research, 2004, 9(4):347-354.

[34] 杨玉盛, 陈光水, 郭剑芬, 等. 杉木观光木混交林凋落物分解及养分释放的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(3):275-282.

YANG Y S, CHEN G S, GUO J F, *et al.* Litter decomposition and nutrient release in a mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum* [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(3):275-282. (in Chinese)

[35] 吴锡麟. 厚荚相思木麻黄混交林分结构和生物量的研究[J]. 福建林学院学报, 2003, 23(3):236-239.

WU X L. Study on the biomass and structure of mixed forests of *Acasia crassicarpa* and *Casuarina equisetifolia* [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2003, 23(3):236-239. (in Chinese)

(上接第 5 页)

[17] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5):518-522.

ZHOU Y R, YU Z L, ZHAO S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2000, 24(5):518-522. (in Chinese)

[18] 方运霆, 莫江明, B. SANDRA, 等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1):135-142.

FANG Y T, MO J M, SANDRA B, *et al.* Storage and distribution of soil organic carbon in Dinghushan Biosphere Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1):135-142. (in Chinese)

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

[20] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5):126-133.

CHEN F S, ZENG D H, HE X Y. Soil nitrogen transformation and cycling in forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5):126-133. (in Chinese)

[21] 潘忠松, 丁访军, 戴全厚, 等. 黔南马尾松人工林土壤有机碳的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(2):75-80.

PAN Z S, DING F J, DAI Q H, *et al.* Study on soil organic carbon of *Pinus massoniana* Lamb plantation in southern Guizhou Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(2):75-80. (in Chinese)

[22] 董莉丽, 郑粉莉. 黄土丘陵区土地利用类型对土壤微生物特征和碳密度的影响[J]. 陕西师范大学学报, 2009, 37(4):88-94.

DONG L L, ZHENG F L. Effects land-use types on soil microbial characteristics and carbon density in the loessial hilly-gully region[J]. Journal of Shanxi Normal University, 2009, 37(4):88-94. (in Chinese)

[23] 欧阳磊, 周冀衡, 段志超, 等. 云南沾益植烟土壤 pH 分布特征及其与土壤养分关系[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(4):692-697.

OUYANG L, ZHOU H J, DUAN Z C, *et al.* The pH distribution and its relationship to soil nutrient Zhanyi tobacco-growing areas in Yunnan Province [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2013, 35(4):692-697. (in Chinese)

[24] 吉鹏飞, 耿增超. 西安浐灞生态区绿地土壤养分及酶活性特征[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3):57-62.

J I P F, GENG Z C. Soil nutrient characteristics and enzyme activity for green space in Chanba area of Xi'an[J]. Journal of Northwest Forest University, 2013, 28(3):57-62. (in Chinese)

[25] 刘妹媛, 刘月秀, 叶金盛, 等. 广东省桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8):1981-1985.

LIU S Y, LIU Y X, YE J S, *et al.* Soil organic carbon density of *Eucalyptus* plantations in Guangdong Province of China and related affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(8):1981-1985. (in Chinese)