

云南红河流域麻疯树人工幼龄林碳密度与分配特征

谷丽萍¹, 郭永清¹, 郎南军¹, 杨旭¹, 泽桑梓¹, 李江¹, 阮宏华², 谷晓萍³

(1. 云南省林业科学院, 云南昆明 650204; 2. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏南京 210037;
3. 沈阳农业大学 林学院, 辽宁沈阳 110866)

摘要: 用平均标准木法建立了云南红河流域麻疯树 *Jatropha curcas* 人工幼龄林不同器官生物量回归方程, 并采用 VARIO EL 元素分析仪测定了麻疯树不同器官的含碳率, 开展了麻疯树人工幼龄林生态系统植被生物量和土壤有机碳质量分数和碳密度研究。结果表明: 用 $y = 25.005(D^2H)^{0.952}$ 方程测算出麻疯树人工幼龄林生态系统生物量为 $26.03 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。不同器官含碳率变幅范围为 39.35%~56.74%, 其中果实含碳率为 56.74%, 干枝含碳率为 45.87%, 根含碳率为 45.12%, 叶含碳率为 39.35%, 平均含碳率为 47.27%。麻疯树幼龄林碳密度为 $5.54 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 灌木和草本植物碳密度为 $3.78 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 凋落物碳密度为 $2.59 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。麻疯树幼龄林土壤表层 0~10 cm 有机碳质量分数最大, 为 $16.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。图 2 表 3 参 25

关键词: 森林生态学; 麻疯树; 生物量; 碳密度; 红河流域

中图分类号: 817.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2010)05-0671-06

Carbon density and allocation in young *Jatropha curcas* stands of the Honghe Region, Yunnan Province

GU Li-ping¹, GUO Yong-qing¹, LANG Nan-jun¹, YANG Xu¹, ZE Sang-zi¹, LI Jiang¹,
RUAN Hong-hua², GU Xiao-ping³

(1. Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650204, Yunnan, China; 2. College of Forestry Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China)

Abstract: Stand density of *Jatropha curcas* and the soil organic carbon content ratio of different organs compared to the whole plant in the Honghe Region, Yunnan Province was determined. Using the mean tree sampling method (20 m × 20 m) a regression equation for estimating biomass of different organs in young stands was established, and carbon content ratios were determined with a VARIO EL elemental analyzer. Then vegetative biomass and organic carbon allocation of the stand were calculated. Results showed that the best regression equation for calculating the biomass of young *J. curcas* was $y = 25.005 (D^2H)^{0.952}$. Based on this equation and the sampling plots, biomass of the young forest was $26.03 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$. Carbon content ratios for the different organs ranged between 39.35% - 56.74% with fruit = 56.74%, stems = 45.87%, roots = 45.12%, leaves = 39.35%, and the mean carbon content ratio for the whole plant = 47.3%. Also, carbon density was: *J. curcas* = $5.54 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, shrub-grass = $3.78 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, and litter = $2.59 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$. Additionally, the organic carbon content ratio was highest ($16.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) at the 0 - 10 cm soil layer depth. [Ch, 2 fig. 3 tab. 25 ref.]

Key words: forest ecology; *Jatropha curcas*; biomass; carbon density; Honghe Region

收稿日期: 2009-11-12; 修回日期: 2010-04-07

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAD95B09, 2007BAD32B02); 国家林业局公益性项目(200804006, 200704005/wb02)

作者简介: 谷丽萍, 助理研究员, 从事森林生态学研究。E-mail: glpsxsc@163.com。通信作者: 郭永清, 助理研究员, 博士, 从事森林碳汇及林业生态工程学研究。E-mail: gyq2001@163.com

全球 1 m 深土壤有机碳储量约为 1 750 Pg, 是大气碳储量的 2 倍, 是陆地植物碳储量的 3 倍^[1]。森林作为陆地生态系统的主体, 包含了陆地生态系统地上碳储量的 80% 和地下碳储量的 40%^[2], 且森林土壤碳密度远高于土壤圈平均碳密度^[3]。森林土壤碳库即使发生微小的变动, 也会引起大气二氧化碳浓度的显著变化^[4], 所以森林生态系统碳循环就成为当前研究的热点^[5-6]。在估算森林生态系统碳储量时, 森林生物量是一个重要的参考依据。从 20 世纪 60 - 70 年代开始的国际生物学计划 (IBP) 工作到后来把生物量与全球碳平衡结合起来研究为森林生态系统碳储量奠定了基础^[7-9]。尽管国内外学者在森林碳循环方面开展了大量的研究工作, 但由于土壤有机碳是土壤养分循环转化的核心, 易受气候和土地利用变化的影响^[10-11], 导致目前在全球碳平衡预算仍有 1.6 ~ 2.0 Pg·a⁻¹ 的二氧化碳去向不明, 依然是科学界未解决的一大难题^[12]。Luyssaert 等^[13]研究发现 15 ~ 800 a 的老龄林土壤是巨大的碳汇, 周国逸等^[14]为寻找未知碳汇的去处提供了新的思路, 但有关土壤有机碳积累的机制还不清楚, 因此, 目前国际上在土壤碳源或汇的功能影响方面仍存在着争议与不确定性^[15]。随着大气二氧化碳浓度的进一步升高及其对未来气候变化的潜在影响, 迫切需要评估生态系统管理对碳储量的影响, 特别是中国人工林面积持续增加, 了解影响人工林土壤有机碳动态变化的机制、因子和碳储量对预测森林生态系统管理与土壤有机碳之间的关系至关重要^[16-17]。麻疯树 *Jatropha curcas* 为大戟科 Euphorbiaceae 麻疯树属 *Jatropha* 落叶灌木或小乔木, 又名膏桐、小桐子、青桐木等, 生长于云南省南部、西南部、中部以及金沙江、怒江、红河、元江等流域海拔 1 600 ~ 1 800 m 以下的干热河谷地区^[18], 生长快, 适应性强, 是干热河谷地区一种较好的水土保持树种, 在生态恢复方面能发挥积极的作用, 特别是在替代化石燃料方面具有很大的潜力。笔者对云南红河流域干热河谷区麻疯树人工幼龄林生物量、不同器官含碳率以及土壤有机碳等方面开展了研究, 为估算麻疯树人工林的碳汇能力及其对未来气候变化的响应提供基础数据和科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省红河流域的元阳县 (22°49' ~ 23°19'N, 102°27' ~ 103°13'E), 海拔 350 m, 属于亚热带季风气候类型, 年均气温为 16.4 °C, 年均降水量 900 mm, 但分布不均, 有明显的干、湿季之分。稀树-灌草是该区植被的主要特征, 灌木植被主要包括朴叶扁担杆 *Grewia celtidifolia*, 牛角瓜 *Calotropis gigantea*, 车桑子 *Dodonaea viscosa*, 黄连木 *Pistacia chinensis*, 虾子花 *Woodfordia fruticosa* 等; 草本主要以扭黄茅 *Heteropogon contortus* 和拟金茅 *Eulaliopsis binata* 为主, 伴有地石榴 *Ficus tikova*, 小菅草 *Themeda hookeri* 等; 另有少量印楝 *Azadirachta indica*, 酸角 *Tamarindus indica* 等乔木树种。研究区麻疯树栽植于 2005 年, 株行距为 2 m × 3 m, 面积 106 hm²。林地土壤为红壤和燥红壤, 土壤理化性质见表 1。

表 1 麻疯树人工幼龄林林地土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil in *Jatropha curcas* plantation

土层厚度/cm	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	容重/(g·cm ⁻³)	pH 值
0 ~ 10	140.00 ± 1.23	29.74 ± 0.71	163.17 ± 1.09	38.31 ± 0.56	1.523 ± 0.022	7.06
10 ~ 25	125.26 ± 1.05	24.58 ± 0.45	143.46 ± 0.19	32.64 ± 0.71	1.61 ± 0.089	6.99
25 ~ 40	104.63 ± 0.60	4.59 ± 0.31	108.56 ± 0.47	31.88 ± 0.15	1.659 ± 0.025	7.03

1.2 研究方法

1.2.1 麻疯树林及灌木、草本层生物量测定 于 2008 年 5 月在麻疯树人工幼龄林试验区内根据立地条件、坡度、坡向和坡位等因子的差异共设置了 20 m × 20 m 的样地 30 块, 对样地内的麻疯树林木进行每木检尺, 测量株高、地径、冠幅和总枝数, 并在每块样地内按地径选择平均标准木 1 ~ 2 株, 共计 67 株。将所有标准木伐倒并全部挖掘根系, 实测叶、干枝和根的鲜质量, 然后分别对叶、干枝和根取样, 同时在样地内按对角线设置 5 个 2 m × 2 m 的样方, 调查灌木和草本植物种类、数量、高

度和盖度，并采集样品带回实验室在 85 ℃烘箱中烘干至恒量，换算干物质质量。

1.2.2 麻疯树林不同器官生物量回归方程 以 67 株麻疯树平均标准木的地径(D)、株高(H)和地径平方乘株高(D^2H)为自变量进行回归分析。数据统计和分析采用 SPSS16.0 软件。

1.2.3 含碳率测定及碳密度计算 含碳率测定：将 67 株不同径阶的标准木样品烘干至恒量，用高速粉碎机粉碎后过 200 目筛，用 VARIO EL 元素分析仪测定，重复 3 次，各测定结果取平均值。

土壤有机碳测定：于 2008 年 11 月在试验地内，除去表层凋落物后，用直径为 2 cm 的土壤取样器采取 0 ~ 10, 10 ~ 25 和 25 ~ 40 cm 层土各 1 份，各份土壤样品由在对应的样地内随机采取的 20 个土芯混合而成，土壤样品自然风干去杂后过 100 目筛，用重铬酸钾-硫酸氧化法测定各土层有机碳质量分数(GB 9834 - 1988)，重复 3 次，

土壤容重测定：环刀法。全株含碳率计算：麻疯树人工幼龄林全株平均含碳率是各器官含碳率的加权平均值，计算公式为： $\bar{C} = \sum B_i C_i$ 。其中： \bar{C} 为麻疯树全株平均含碳率； B_i 为各器官占全株生物量的百分比； C_i 为各器官的平均含碳率； i 为果实、叶、干枝、根。土壤有机碳密度/($t \cdot \text{hm}^{-2}$) = 土壤有机碳质量分数/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) × 土壤容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) × (1 - 砾石体积含量/%) × 土层厚度/cm × 10^{-1} 。

2 结果与分析

2.1 麻疯树人工幼龄林不同器官生物量回归方程

采用回归方程来估算森林生物量(y)被认为是目前最佳的方法，分别以麻疯树幼龄林的地径(D)、株高(H)和地径平方乘株高(D^2H)作为自变量进行回归分析。结果表明，地径平方(D^2)乘株高(H)双因子为自变量建立的数学模型估算麻疯树人工幼龄林生物量效果最佳。在所建立的叶、干枝、根和全株生物量回归模型中，叶片的估算精度最小，主要是由于叶片受风、自身凋落等因素的影响较大，造成生物量的损失，而其余回归方程相关系数均在 0.9 以上。其中 D^2H 与叶的生物量间为“S”形曲线函数关系，与干枝生物量间为幂函数关系，与根生物量间为二次方程曲线函数关系，与全株生物量间为幂函数关系。经检验，4 个生物量回归方程均极显著($P < 0.01$)(表 2)。

表 2 麻疯树人工幼龄林不同器官生物量回归方程

Table 2 Biomass regression equation of different organs of *Jatropha curcas* stand

器官	回归方程	R^2	F 值	P 值
叶	$y = e^{(6.935-99.614/D^2H)}$	0.587	90.811	0.000
干枝	$y = 11.944(D^2H)^{1.02}$	0.944	1087.640	0.000
根	$y = 208.756 + 3.009D^2H + 0.002(D^2H)^2$	0.936	462.967	0.000
全株	$y = 25.005(D^2H)^{0.952}$	0.941	1012.320	0.000

说明：方程中株高单位为 m，地径单位为 cm。

2.2 麻疯树人工幼龄林生态系统含碳率特征及碳密度

从表 3 可以看出，麻疯树人工幼龄林不同器官含碳率变幅范围为 39.35% ~ 56.74%，麻疯树叶含碳率最小为 39.35%，果实含碳率最高，达到了 56.74%，果实含碳率是叶含碳率的 1.44 倍。在 4 个不同器官中，果实含碳率变异系数最小，根含碳率变异系数最大，含碳率大小顺序为：果实 > 干枝 > 根 > 叶。方差分析表明，不同器官之间含碳率差异极显著($P < 0.01$)。采用各器官含碳率加权平均值计算的麻疯树植株平均含碳率为 47.27%，林下小灌木、草本和凋落物平均含碳率

表 3 麻疯树人工幼龄林不同器官含碳率

Table 3 Carbon content ratio of different organs of young *Jatropha curcas* stand

器官	含碳率/%	变异系数%
果实	56.74	0.266
叶	39.35	0.335
干枝	45.87	0.285
根	45.12	0.620
植株平均	47.27	

为 44.58%。

根据所建立的麻疯树全株生物量估算方程 $y = 25.005(D^2H)^{0.952}$ 和样方调查资料, 测算出单位面积麻疯树人工幼龄林生物量合计 $11.72 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (其中果实实测生物量为 $2.25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$), 灌木和草本植物生物量为 $8.49 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 凋落物生物量为 $5.82 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各组分含碳率计算表明, 麻疯树人工幼龄林碳密度为 $5.54 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 灌木和草本植物碳密度为 $3.78 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 凋落物碳密度为 $2.59 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.3 麻疯树人工幼龄林土壤有机碳质量分数和碳密度

从图 1 可以看出, 麻疯树人工幼龄林土壤有机碳质量分数随着土层厚度的加深而逐渐降低, 表层 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤有机碳质量分数为 $16.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $10 \sim 25 \text{ cm}$ 土层有机碳质量分数为 $11.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $25 \sim 40 \text{ cm}$ 土层有机碳质量分数为 $10.57 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表层 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤有机碳质量分数是 $25 \sim 40 \text{ cm}$ 的 1.57 倍。主要是由于表层土壤分布有大量的植物根系, 土壤动物活动强烈, 同时地上部分植被凋落物的输入等都为其提供了丰富的碳源, 所以有机碳较多。而麻疯树人工幼龄林土壤 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层有机碳密度为 $22.76 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, $10 \sim 25 \text{ cm}$ 土层有机碳密度为 $24.45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, $25 \sim 40 \text{ cm}$ 土层有机碳密度为 $21.73 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图 2)。方差分析表明, 麻疯树人工林地不同土层有机碳质量分数和碳密度差异均显著 ($P < 0.05$)。

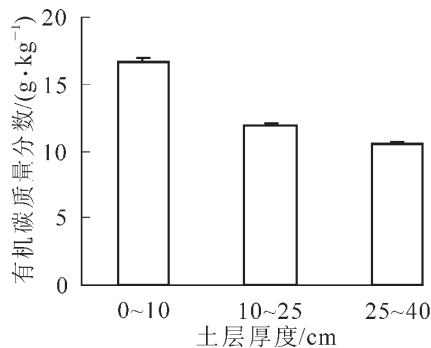


图 1 麻疯树人工幼龄林不同土层有机碳

Figure 1 Organic carbon content ratio of different soil depths in young *Jatropha curcas* plantation

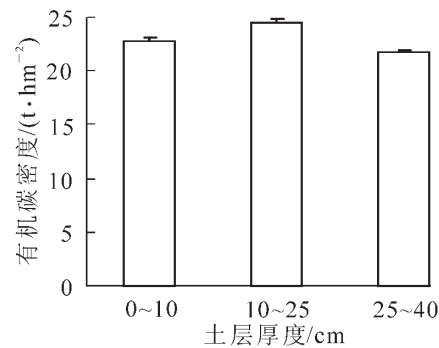


图 2 麻疯树人工幼龄林不同土层有机碳密度

Figure 2 Organic carbon density of different soil depths in young *Jatropha curcas* plantation

3 结论与讨论

3.1 结论

以麻疯树幼龄林地径平方乘株高 (D^2H) 双因子为自变量建立的全株生物量回归模型 $y = 25.005(D^2H)^{0.952}$ ($r^2 = 0.941$) 来估算植株生物量具有实用性; 采用全株生物量回归模型和样方调查资料, 估算出麻疯树人工幼龄林单位面积生物量合计 $11.72 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (其中果实实测生物量为 $2.25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$), 灌木、草本植物和凋落物生物量为 $14.31 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。麻疯树人工幼龄林碳密度为 $5.54 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 灌木和草本植物碳密度为 $3.78 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 凋落物碳密度为 $2.59 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

麻疯树人工幼龄林不同器官含碳率大小顺序为: 果实 > 干枝 > 根 > 叶; 表层 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤有机碳质量分数和碳密度分别为 $16.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $22.76 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

3.2 讨论

在计算森林生态系统的碳储量时, 主要是通过植被生物量与植被含碳率进行转换来实现的, 且通常采用 $0.45 \sim 0.50$ 作为林木的平均含碳率^[19-20], 但是由于林木含碳率受到立地条件、生长特性、树种类型、海拔、温度等环境因子的影响, 因而造成不同树种甚至同一树种不同器官之间含碳率也有差异。本研究中麻疯树果实含碳率最高 (56.74%), 叶含碳率最低 (39.35%), 植株平均含碳率达到了 47.27% , 这与中国华北 10 种灌木树种平均含碳率 (48.97%)^[21] 和千烟洲几种主要灌木含碳率^[22] 很接近。

生物量是估算森林碳汇的重要参考指标。本研究中所测定的麻疯树人工林属于幼龄林, 所以估算出来的生物量相对较小, 而林地灌木、草本和凋落物单位面积的生物量比例较大, 占到了 56.47% 。

森林土壤是森林生态系统最大的有机碳库^[23], 主要来源于植物、动物、微生物残体和根系分泌物, 并处于不断分解与形成的动态过程, 而植被类型、立地条件等因素对土壤有机碳密度会造成很大的影响。本研究中麻疯树人工林表层 0 ~ 10 cm 土壤有机碳质量分数和碳密度最大, 随着土层厚度的增加, 有机碳质量分数逐渐减小, 这与其他作者研究结果相一致^[24], 但由于麻疯树人工林位于中国西南的干热河谷区, 植被以典型的稀树-灌草为主, 其特殊的生境, 决定了其土壤有机碳质量分数和碳密度比中国热带和亚热带地区其他植被类型土壤有机碳质量分数和碳密度低^[25]。

参考文献:

- [1] HOUGHTON J T, DING Y, GRIGGS D J, *et al.* *Climate Change 2001: the Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, **263**: 185 - 190.
- [3] AMTHOR J S, HUSTON M A. *Terrestrial Ecosystem Responses to Global Change: A Research Strategy* [R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1998.
- [4] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, **44B**: 81 - 99.
- [5] BERINGER J, HUTLEY L B, TAPPER N J, *et al.* Savanna fires and their impact on net ecosystem productivity in North Australia [J]. *Global Change Biol*, 2007, **13** (5): 990 - 1004.
- [6] COOPS N C, BLACK T A, JASSAL R S, *et al.* Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand [J]. *Remote Sens Environ*, 2007, **107**: 385 - 401.
- [7] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量 [J]. *生态学报*, 1996, **16** (5): 497 - 508.
FANG Jingyun, LIU Guohua, XU Songling. Biomass and net production of forest vegetation in china [J]. *Acta Ecol Sin*, 1996, **16** (5): 497 - 508.
- [8] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 第 2 代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡 [J]. *中南林学院学报*, 2002, **22** (1): 1 - 6.
FANG Xi, TIAN Dalun, XIANG Wenhua, *et al.* Carbon dynamics and balance in the ecosystem of the young and middle-aged second-generation chinese fir plantation [J]. *J Central South For Univ*, 2002, **22** (1): 1 - 6.
- [9] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 毛竹、杉木人工林生态系统碳贮量及其分配特征 [J]. *生态学报*, 2007, **27** (7): 2794 - 2801.
XIAO Fuming, FAN Shaohui, WANG Silong, *et al.* Carbon storage and spatial distribution in *Phyllostachy pubescens* and *Cunninghamia lanceolata* plantation ecosystem [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27** (7): 2794 - 2801.
- [10] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2004, **15** (4): 593 - 599.
WU Jianguo, ZHANG Xiaoquan, XU Deying. Impact of land-use change on soil carbon storage [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15** (4): 593 - 599.
- [11] 彭文英, 张科利, 杨勤科. 退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测 [J]. *地域研究与开发*, 2006, **25** (3): 94 - 99.
PENG Wenying, ZHANG Keli, YANG Qingke. Forecast of impact of the returning farms to forests on soil organic carbon of loess plateau [J]. *Areal Res Develop*, 2006, **25** (3): 94 - 99.
- [12] 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO₂ 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇 [J]. *植物生态学报*, 2001, **25** (5): 594 - 602.
FANG Jingyun, PIAO Shilong, ZHAO Shuqing. The carbon sink: the role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the northern hemisphere [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2001, **25** (5): 594 - 602.
- [13] LUYSSAERTS, SCHULZEED, BÖRNER A. Old-growth forests as global carbon sinks [J]. *Nature*, 2008, **455**: 213 - 215.
- [14] ZHOU Guoyi, LIU Shuguang, LI Zhian, *et al.* Old-growth forests can accumulate carbon in soils [J]. *Science*, 2006, **314**: 1417 - 1417.
- [15] MALHI Y, BALDOCCHI D D, JARVIS P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests [J]. *Plant Cell Environ*, 1999, **22** (6): 715 - 740.
- [16] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, **304**: 1623 -

- 1626.
- [17] YANAI R D, CURRIE W S, GOODALE C L. Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered [J]. *Ecosystems*, 2003, **6**: 197 – 212.
- [18] 曾觉民. 可大力发展的生物质能源植物——膏桐[J]. 云南林业, 2006, **27** (2): 21 – 22.
ZENG Juemin. *Jatropha curcas*, a biomass energy plant, worth more attention in Yunnan Province [J]. *Yunnan For*, 2006, **27** (2): 21 – 22.
- [19] HOUGHTON R A, SKOLE D L, NOBRE C A, *et al.* Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon [J]. *Nature*, 2000, **403**: 301 – 304.
- [20] FANG Jingyun, CHEN Anping, PENG Changhui, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, **292**: 2320 – 2322.
- [21] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, **24** (5 – 6): 96 – 100.
MA Qinyan, CHEN Xialin, WANG Juan, *et al.* Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2002, **24** (5–6): 96 – 100.
- [22] 沈文清, 刘允芬, 马钦彦, 等. 千烟洲人工针叶林碳素分布、碳贮量及碳汇功能研究[J]. 林业实用技术, 2006 (8): 5 – 8.
SHEN Wenqing, LIU Yunfang, MA Qinyan, *et al.* Carbon storage of artificial forest in Qianyanzhou, Jiangxi [J]. *Pract For Technol*, 2006 (8): 5 – 8.
- [23] 杨万勤, 张健, 胡庭兴, 等. 森林土壤生态学[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2006: 413 – 416.
- [24] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, **24** (3): 469 – 476.
FU Hua, CHEN Yaming, WANG Yanrong, *et al.* Organic carbon content in major grassland types in Alex, Inner Mongolia [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (3): 469 – 476.
- [25] 方运霆, 莫江明, SANDRA B, 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 Yunting, MO Jiangming, SANDRA B, *et al.* Storage and distribution of soil organic carbon in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (1): 135 – 142.