

雷竹生态系统植物固碳效益及其动态变化^①

王 移^{1,2}, 梁 音^{1*}, 曹龙熹¹, 卢慧中^{1,2}, 袁久芹^{1,2}, 陈 玲¹

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 雷竹是我国南方地区近年来大力推广的一种新型竹种, 具有较好的固碳增汇潜力。本文选取 6 种不同林龄的雷竹林地开展样方调查和采样分析, 系统地探讨了雷竹林地生态系统中植物固碳的动态变化。研究结果表明, 雷竹林地立竹密度和平均胸径在 1~6 年内随林龄的增加而增大, 而 6 年以上林龄的立竹密度则呈下降趋势, 平均胸径的增幅也趋缓。雷竹各器官的平均含碳率排序为竹秆(423 g/kg)> 竹枝(412 g/kg)> 竹叶(385 g/kg)> 竹根(363 g/kg)。竹林地上部分秆茎和枝叶是主要的植物储碳源, 占储碳总量的 70% 以上, 其中秆茎的碳储量最大且随种植年限的增加趋势最为显著。竹林植物总固碳量在 3~6 年时段内的增加速度最快, 其余时段增速较缓, 10 年以上林龄的雷竹植物固碳量趋于稳定。

关键词: 雷竹; 碳储量; 生物量; 动态变化

中图分类号: S714

竹林生态系统是我国森林生态系统的重要组成部分, 在温室气体的减排和森林碳汇中发挥着积极的作用。研究表明, 竹林的储碳量占我国森林资源碳储总量的 2.54%^[1], 预计未来随着竹林种植密度和面积的增加, 竹林储碳在整个森林碳储量中的比例会继续增大^[2]。研究竹林生态系统的固碳机理及其动态变化, 对于正确认识竹林在森林固碳中的地位, 提高竹林固碳效益具有重要意义。

我国竹子种类繁多, 其中雷竹(*Phyllostachys praecox*)是近年来筛选出的优良笋用竹种^[3]。雷竹又名早竹、早园竹, 因早期打雷即出笋而得名, 为禾本科竹亚科刚竹属植物, 是我国出笋最早的优良散生笋用竹种^[4]。由于雷竹笋味鲜美、产量高、效益大, 因而在生产上被大面积推广, 我国长江以南各省均有栽培, 其中以浙江省面积最大^[5]。除了具有极高的营养价值和经济价值, 雷竹林在固碳增汇方面也发挥着重要的作用^[5]。而目前学者们对雷竹林地生态系统固碳机理的认识仍不够清楚, 现有的竹林固碳研究大多以毛竹、慈竹、苦竹等为对象^[6-11], 关于雷竹林地固碳效益及其动态变化的报道较少。主要研究包括: 姜培坤等^[5]探讨了雷竹高效栽培措施对土壤碳库的影响, 并对雷竹林土壤有机碳总量进行了估算; 孙晓等^[4]

分析了集约经营下雷竹种植对土壤基本性质的影响, 阐明了竹林土壤有机质和养分元素随种植年限的变化趋势; 黄张婷等^[12]研究了 1~4 年竹龄雷竹中碳、硅等元素的吸收和积累特征, 分析了不同植物器官中元素的含量及其随竹龄的动态变化。以上研究对于深刻理解雷竹林地的环境效益具有积极意义, 但都偏重于竹林固碳效益的某一方面, 对雷竹生态系统固碳增汇机制的描述仍不够全面; 另外在分析林龄影响方面所采用的资料时间序列较短, 在一定程度上影响了研究结果的可靠性。

本研究选取不同林龄的雷竹林地, 分析不同栽培年限雷竹各器官的生物量和含碳率特征, 探讨雷竹生长指标与植物固碳量之间的关系, 系统地阐述竹林生态系统中植物固碳部分的动态变化趋势。研究结果可为改善雷竹林的经营管理方式、提高雷竹生态系统的固碳效益提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究区位于安徽省宣城市宁国县仙霞镇。地理坐标 30°23'27"N、119°14'15"E, 属皖南山区的一部分, 地势南高北低, 东南与天目山相连, 西部为黄山余脉

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070303)、国家自然科学基金青年科学基金项目(41101253)和中国科学院南京土壤研究所知识创新工程领域前沿项目(ISSASIP1116)资助。

* 通讯作者(yliang@issas.ac.cn)

作者简介: 王移(1981—), 女, 四川广元人, 博士研究生, 研究方向为生态环境评价与修复。E-mail: wangyi@issas.ac.cn

延伸,属中纬度北亚热带季风气候,常年受东南季风的影响,气候温暖湿润,多年平均气温 15.4℃,日照时数 2 234 h,无霜期 220 天左右,平均降雨量 1 468 mm,蒸发量 807 mm。该区大部分地区的土壤类型以麻石黄红壤和偏石黄红壤以及红壤性偏砂土为主,其上覆盖着常绿阔叶林、次生常绿阔叶与落叶阔叶混交林、马尾松林、杉木林以及多种经济林^[13]。

1.2 试验地选择和样品采集

本研究试验样地选择在宁国县仙霞镇的雷竹现代科技示范园区,雷竹林由水稻田改种,共包含 6 个种植年份(1999、2002、2006、2009、2010 和 2011 年)的样地。在改种前一年的冬季对农田进行整地和深翻,清除大的石块等杂物,于次年 2—3 月间定植竹母进行造林。林地施肥每年分 4 次,分别为 5 月中旬、8 月中旬、10 月中旬以及 12 月至来年 2 月之间,每年施肥总量为厩肥 37.5 t/hm²,竹笋专用肥 3.9 t/hm²,尿素 0.45 t/hm²,氮、磷、钾营养元素的比例为 3:1:2。为保持合理的竹林密度和立竹年龄结构,尽量伐去 4 年以上的老竹,在新竹长成后结合深翻进行采伐,采伐时连竹蔸一起挖去。每年 3 月份开始采集春笋,4 月进入旺季,笋期约持续 50 天。

样品采集工作于 2012 年 5 月开展,在不同年份的样地中分别设置 3 块大小为 10 m × 10 m 的调查样方,统计每个样方中雷竹的株数,以便计算出不同年限栽培的雷竹林的密度;同时测定样方内雷竹的胸径,并采用目测法估测竹竿高度。按照以上测定值确定每块样地中雷竹标准竹的株高和胸径(标准竹的株高和胸径与平均值相差小于 5%),以此为依据选取 1 株生长发育正常的标准竹以测定雷竹含碳率,将所选取的标准竹连同根系一起挖出,根茎交界处为界,分为地上部分和地下部分。地上部分分别测定竹杆、竹枝和竹叶的鲜重;地下部分在相应位置挖取 1 m × 1 m 的小样方,挖出竹鞭、根蔸和须根,挖至无根为止,用水仔细漂洗,再用筛子在水中筛洗后捞出所有的根,风干表面水后称其鲜重并记录。最后对每个器官(竹杆、竹枝、竹叶、竹根)分别取样 300 ~ 500 g 带回实验室分析(不足 300 g 的全部带回实验室)。其中竹杆是在基径、胸径、中部和顶部位置分别取样组成一个混合样^[14]。雷竹林地枯落物也是植物固碳的组成部分,在各样方中沿对角线分别选择 3 个 0.5 m × 0.5 m 的小样方,收集小样方内所有的枯枝落叶供后续分析。本研究共采集雷竹植物样品 98 个,其中枯枝落叶样品为 30 个,雷竹的根、茎、枝、叶样品 68 个。

1.3 指标测定和固碳效益计算

将所采集的植物样品在 105℃ 下杀青 30 min,再 80℃ 烘干至恒重,记录样品干重后粉碎待用,采用重铬酸-外加热法测定样品中的有机碳含量^[15],用于计算各器官的含碳率和植物总固碳量。雷竹不同器官的含碳量计算方法为:

$$C_i = D_i \times W_i \quad (1)$$

式中: C_i 为某一器官的固碳量(g), D_i 为该器官的含碳率(g/kg), W_i 为该器官的干重(kg),在计算各器官固碳量的基础上得到各调查样方所采集标准竹的固碳量,乘以样方内所有雷竹的株数,得到单位面积雷竹林地上植物的固碳量,再加上单位面积内枯落物的固碳量得到单位面积雷竹林的植物固碳量:

$$C_s = n \sum C_i + C_k \quad (2)$$

式中: C_s 为样方内植物固碳总量(t/hm²), C_i 为某一器官的固碳量(g), n 为样方内雷竹株数, C_k 为林下枯落物固碳量(g)。

1.4 数据处理

试验数据使用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 进行整理和分析,采用相关分析和回归分析方法量化雷竹生长指标和固碳效益的动态变化,并使用 Origin 7.5 软件对分析结果进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同林龄雷竹生态指标的变化

不同栽种年限的雷竹林生长情况不同,雷竹立竹密度和胸径是决定竹林生物量的重要指标,也是理解竹林固碳效益动态变化的基本前提。样方调查表明雷竹立竹密度在 $1.0 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^4$ 株/hm²,图 1 显示了样方内雷竹密度随栽种年限的变化趋势,分段线性回归分析结果表明,1~6 年内雷竹密度随林龄的增加而直线增大,而 6 年以上林龄的雷竹密度则呈现下降趋势。在人为管理调控下可以使雷竹林的密度逐渐达到一个稳定值,利于雷竹林保持较高的生产力。以往研究表明雷竹林的立竹密度控制在 $1.5 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^4$ 株/hm² 时,雷竹林的生产力水平较高^[16-17],这一范围也位于图 1 左侧的上升段。图 2 所示为调查样方内雷竹平均胸径随种植年限的变化趋势,可以看出,雷竹胸径在 8~13 cm 变化,随着生长年限的增加呈幂函数趋势增大,拟合方程的幂指数小于 1,说明胸径增大的趋势将逐渐减缓,这可能是由于雷竹林的立竹密度变大,加剧了雷竹对光线和水分、营养成分的竞争,因而使得胸径的增加幅度变小。

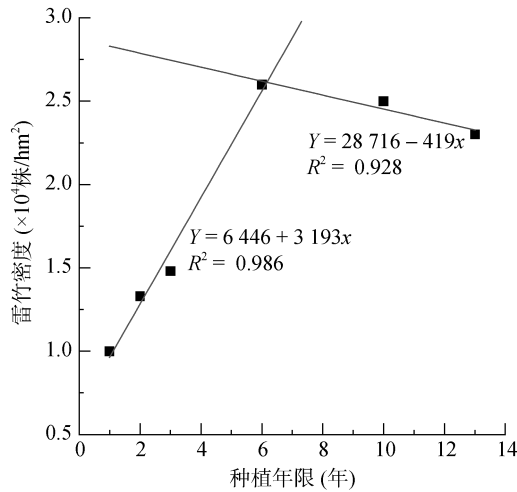


图 1 雷竹林的密度随栽种年限的变化
Fig. 1 Changes of bamboo densities with planting age

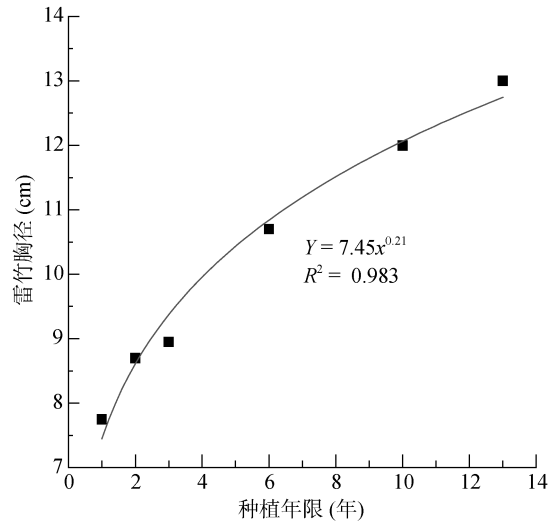


图 2 雷竹平均胸径随栽种年限的变化
Fig. 2 Changes of diameters at breast height with planting age

2.2 雷竹植株含碳率分析

对 6 种林龄雷竹各器官采样测定的含碳率进行分析, 结果如图 3 所示, 不同器官的含碳率在 365 ~ 424 g/kg 之间, 这一含碳率范围低于以往学者对毛竹 (468 ~ 521 g/kg)^[7]和慈竹(460 ~ 511 g/kg)^[8]等其他竹类平均含碳率的研究结果。雷竹各器官之间含碳率由高到低依次为: 竹秆 > 竹枝 > 竹叶 > 竹根, 这一排序与黄张婷等^[12]的分析结果一致, 其中雷竹秆茎与其他器官的含碳率差异显著, 枝和叶的含碳率

差异性不明显, 根系的含碳率显著低于其他器官。进一步分析不同栽培年限雷竹各器官含碳率变化(图 4), 从图 4 中可以看出雷竹根茎枝叶的含碳率整体上随种植年限延长而增大, 但不同器官的增加趋势存在差异, 对雷竹根、秆、枝来说, 种植前 3 年的含碳率增加斜率较大, 之后增加速率逐渐减小, 其中秆茎和枝的含碳率在种植 10 年之后反而减小。而叶片中的含碳率则随种植年限延长呈线性趋势增加。

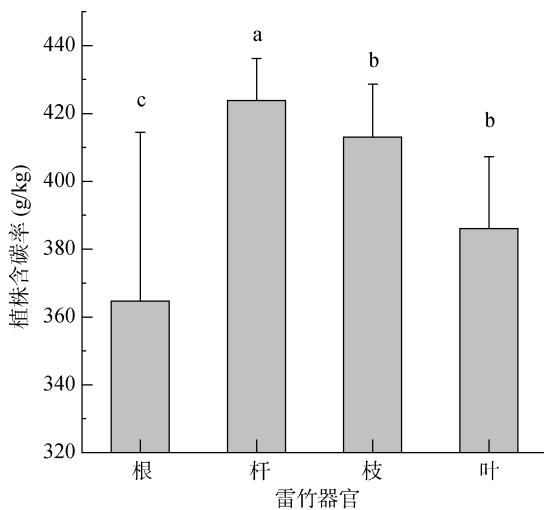


图 3 雷竹不同器官的含碳率
Fig. 3 Carbon contents in different bamboo organs

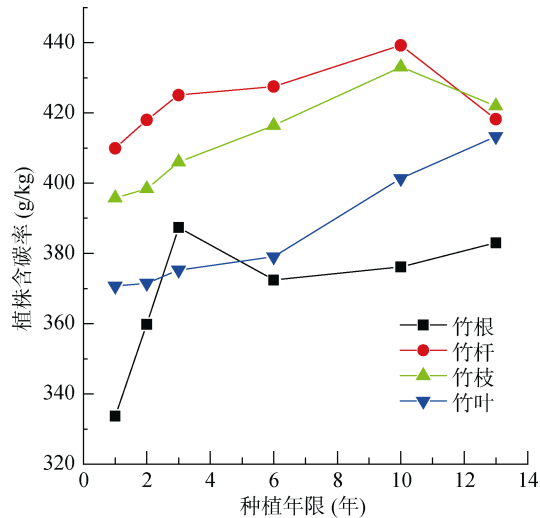


图 4 不同栽培年限雷竹含碳率动态变化
Fig. 4 Changes of carbon contents with bamboo planting age

2.3 雷竹林地碳储量分析

上述结果表明, 6 年以上雷竹林地生长指标即可达到稳定, 以 6 年雷竹林地为例, 统计雷竹各器官的碳储量和生物量, 并计算各部分碳储量占总量的比例(表 1)。从表中可以看出雷竹林的总生物量

为 49.84 t/hm², 碳储量为 19.59 t/hm², 其中秆的碳储量最高为 6.88 t/hm², 占雷竹林地储碳总量的 35.12%; 其次是叶片的储碳量(4.06 t/hm²), 占储碳总量的 20.72%, 竹枝的碳储量为 3.38 t/hm², 占总碳储量的 17.25%。地上部分秆茎和枝叶的储碳量占竹林总量的

表 1 雷竹各器官碳储量
Table 1 Carbon storage in different bamboo organs

雷竹器官	生物量 (t/hm ²)	生物量比例 (%)	碳储量 (t/hm ²)	碳储量比例 (%)
秆	16.27	32.64	6.88	35.12
枝	8.19	16.43	3.38	17.25
叶	10.89	21.85	4.06	20.72
根	9.81	19.68	3.62	18.48
枯落物	4.68	9.39	1.65	8.42
合计	49.84	100.00	19.59	100.00

73.09%，根系和地上枯落物固碳占 26.91%，说明雷竹林地植物固碳主要集中于立竹的地上部分。与其他竹类的固碳能力相比，雷竹林地储碳总量小于毛竹^[7]、慈竹^[8]、苦竹^[9]等的碳储量，而大于孝顺竹^[10]的碳储量。

雷竹生物量和含碳率随种植年限的变化也将影响储碳量的动态特征，进一步分析不同种植年限雷竹各器官的储碳量变化趋势(图 5)，从图中可以看出，雷竹各器官的储碳量整体上随着种植时间的延长而变大，在种植前 3 年内增加速度较缓，且不同器官储碳量之间的差异不大，尤其是竹枝和叶片的变化曲线基本重合。种植 3 年以后雷竹杆茎的储碳量迅速增大，考虑到杆茎含碳率在种植 3 年以后变化幅度并不

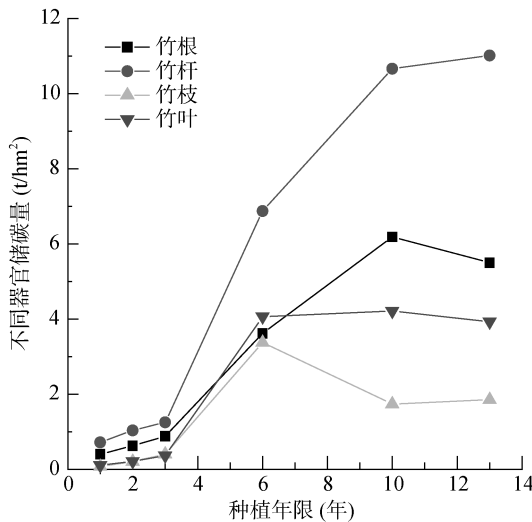


图 5 雷竹各器官的碳储量随栽培年限的变化
Fig. 5 Changes of carbon storages in different bamboo organs with planting age

表 2 雷竹林地植物储碳量随林龄变化方程
Table 2 Carbon storage as functions of planting age

种植年限(年)	储碳量变化曲线
1~3	$y = 1.04x + 0.307$
3~6	$y = 5.4x - 12.83$
6~13	$y = 0.84x + 115.03$

大，储碳量的增加主要是生物量增大所致。根系和枝叶储碳量在种植 3 年之后也快速增大，但增加速率和幅度都显著低于杆茎。其中根系储碳量到第 10 年达到稳定值。竹枝和竹叶的储碳量变化趋势从第 6 年开始出现差异，竹叶储碳量基本稳定，而竹枝则出现下降趋势。

雷竹林植物储碳总量因种植时间长短而具有一定的差异性。分析本研究区内 6 个年份种植的雷竹林的植物储碳总量结果如图 6 所示。从图中可以看出，竹林储碳总量在雷竹林栽种后的前 3 年内增加速度较慢；从 3 年到栽种后的第 6 年时段内雷竹林的植物储碳量增加幅度较大，6 年林龄竹林植物储碳总量较 3 年林龄竹林植物储碳量增加了 4.79 倍；种植 6 年以上的雷竹林植物储碳量仍随年限增加，但增加幅度变小，10 年林龄植物储碳量相比生长 6 年雷竹林只增加了 0.26 倍；10 年以上林龄竹林植物储碳量差别不大。进一步的线性回归分析也支持以上结论(表 2)，1~3 年时段内方程斜率较低，储碳量增加较慢；3~6 年时段内方程斜率显著增大，而大于 6 年时段内方程常数项增加幅度较大，但方程斜率小于 1~3 年时段，说明竹林植物储碳量达到最高值后变化趋于稳定。

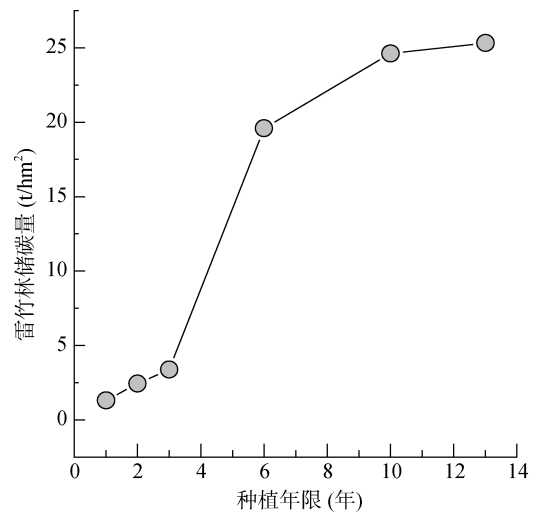


图 6 雷竹林地储碳总量随栽培年限的变化
Fig. 6 Change of bamboo forest total carbon storage with planting age

3 结论

1) 对雷竹林地立竹密度和胸径的样方调查结果表明，雷竹生长状况随种植时间发生变化，种植 1~6 年内立竹密度随林龄的增加而直线增大，而 6 年以上林龄的立竹密度则呈下降趋势。雷竹平均胸径随种植

年限的增加呈幂函数趋势增大,但增大的幅度将逐渐减小。

2) 雷竹不同器官的平均含碳率为 363~423 g/kg,各器官含碳率之间存在显著差异,从高到低的排序为竹秆(423 g/kg)>竹枝(412 g/kg)>竹叶(385 g/kg)>竹根(363 g/kg),各器官的含碳率也随着栽种年限的增加整体上呈增大趋势,除竹叶外,其余器官含碳率均增大至一定程度后达到稳定或减小。

3) 雷竹林地中地上部分秆茎和枝叶的储碳量占竹林总量的 70% 以上,其中秆茎碳储量占雷竹储碳总量的 35.12%,且秆茎储碳量随种植年限的增加幅度也最大,是主要的储碳源。竹林植物总固碳量随种植年限的动态变化可分为 3 个阶段,其中 3~6 年时段内储碳量的增幅最大,其余时段增加速度较缓,10 年以上林龄的雷竹植物固碳量趋于稳定。

参考文献：

- [1] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010: 32-42
- [2] 陈先刚, 张一平, 张小全, 郭颖. 过去 50 年中国竹林碳储量变化[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5 219-5 226
- [3] 汪祖潭, 方伟, 何均潮. 雷竹笋用林高产高效栽培技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995: 5-30
- [4] 孙晓, 庄舜尧, 刘国群, 李国栋, 桂仁意, 何钧潮. 集约经营下雷竹种植对土壤基本性质的影响[J]. 土壤, 2009, 41(5): 784-789
- [5] 姜培坤, 周国模, 徐秋芳. 雷竹高效栽培措施对土壤碳库的影响[J]. 林业科学, 2002, 38(6): 6-11
- [6] 庄舜尧, 季海宝, 张厚喜, 孙波, 桂仁意. 福建省建瓯市毛竹林生态系统固碳状态研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1 200-1 204
- [7] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳储量及其空间分布[J]. 林业科学, 2011, 40(6): 20-24
- [8] 王勇军, 黄从德, 王宪帅. 慈竹林生态系统碳储量及其空间分配特征[J]. 福建林业科技, 2009, 36(2): 6-9
- [9] 申贵仓. 基于净生态系统生产力的毛竹与苦竹林碳汇能力估测[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012
- [10] 沈迪玉, 黄从德, 张密. 四川省纳溪区孝顺竹林生态系统碳储量及其空间分配格局[J]. 四川林业科技, 2010, 31(2): 39-42
- [11] 王刚, 周本智, 李晓靖, 孔维健, 温从辉, 胡晓林. 吊丝单竹林生态系统碳储量及其垂直空间分配特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2012, 20(1): 72-77
- [12] 黄张婷, 姜培坤, 宋照亮, 孟赐福, 吴家森. 不同竹龄雷竹中硅及其他营养元素吸收和积累特征[J]. 应用生态学, 2013, 24(5): 1 347-1 353
- [13] 王宗英, 路有成, 潘志强, 余益胜, 蒋业科. 宁国县马尾松林土壤动物和松叶蜂生态学研究[J]. 林业科学, 23(2): 230-237
- [14] 唐建维, 萧自位, 王小李, 郑丽, 朱兴正, 高丽红. 西双版纳不同林龄人工龙竹林的生物量及其模型[J]. 中南林业科技大学学报, 31(12): 54-60
- [15] 黄宇, 冯宗炜, 汪思农, 冯兆忠, 张红星, 徐永荣. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3 146-3 154
- [16] 周国模, 金爱武. 雷竹林冠层特性和叶片的空间分布[J]. 林业科学, 1999, 35(5): 17-21
- [17] 肖宋高, 陈明亮, 江雄波, 胡云, 张卓文. 集约经营雷竹林份结构特征[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(4): 440-444

Vegetation Carbon Storage Efficiency and Dynamic of *Phyllostachys praecox* Ecology System

WANG Yi^{1,2}, LIANG Yin^{1*}, CAO Long-xi¹, LU Hui-zhong^{1,2}, YUAN Jiu-qin^{1,2}, CHEN Ling¹

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The *Phyllostachys praecox* (Lei bamboo) is new bamboo specie that has been spread widely in south China in recent years. This paper aimed at quantifying the efficiency and dynamics of carbon storage in the *Phyllostachys praecox* vegetation with bamboo fields of 6 different ages. The results showed that bamboo density and average diameter at breast height were increased with planting age within 6 years. Once the forest age exceeded 6 years, the forest density declined and the average diameter at breast height increased slowly. The average carbon content rate for different bamboo organs are sorted as Stems (423 g/kg) > Branch (412 g/kg) > Leaf (385 g/kg) > Roots (363 g/kg). The vegetations upon ground (stems, branch and leaf) accounted for more than 70% of the total carbon storage. Among them the bamboo stems contributed the largest proportion and the carbon storage increased most quickly with planting age. The total vegetation carbon storage increased quickly during 3-6 years, then the increase rate slowed down, and finally the vegetation carbon storage reached the maximum in 10 years, and then maintained stable.

Key words: *Phyllostachys praecox*; Carbon storage; Biomass; Dynamics