

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 22 期
Vol.30 No.22
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 30 卷 第 22 期

2010 年 11 月 (半月刊)

目 次

高温对水稻叶片蛋白质表达的影响·····	曹云英,段 骅,王志琴,等 (6009)
茶园间作柑桔杨梅或吊瓜对叶蝉及蜘蛛类群数量和空间格局的影响·····	叶火香,崔 林,何迅民,等 (6019)
鼠尾藻生长与生殖的权衡·····	张树宝,唐永政,王志芳,等 (6027)
不同氮素水平下超高产夏玉米冠层的高光谱特征·····	陈国庆,齐文增,李 振,等 (6035)
近 100 年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价 ·····	郑粉莉,张 锋,王 彬 (6044)
毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤养分的空间异质性·····	邱开阳,谢应忠,许冬梅,等 (6052)
CO ₂ 浓度倍增对干旱胁迫下黄瓜幼苗膜脂过氧化及抗氧化系统的影响 ·····	李清明,刘彬彬,艾希珍 (6063)
小兴安岭阔叶红松林粗木质残体空间分布的点格局分析·····	刘妍妍,金光泽 (6072)
光照对鄂东南 2 种落叶阔叶树种幼苗生长、光合特性和生物量分配的影响 ·····	杨 莹,王传华,刘艳红 (6082)
不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响·····	林超文,罗春燕,庞良玉,等 (6091)
黄土残塬沟壑区流域次生植被物种分布的地形响应·····	王盛萍,张志强,张建军,等 (6102)
农村土地经营权流转对区域景观的影响——以北京市昌平区为例·····	刘 同,李 红,孙丹峰,等 (6113)
基于农户响应的北方农牧交错带生态改善策略·····	徐建英,柳文华,常 静,等 (6126)
滨岸不同植物配置模式的根系空间分布特征·····	仲启铖,杜 钦,张 超,等 (6135)
三江平原小叶章湿地剖面土壤微生物活性特征·····	杨桂生,宋长春,宋艳宇,等 (6146)
不同水分处理对湿地松幼苗生长与根部次生代谢物含量的影响·····	李昌晓,魏 虹,吕 茜,等 (6154)
生活污水慢渗生态处理对土壤及杨树生长的影响·····	白保勋,杨海青,樊 巍,等 (6163)
玉米连作及其施肥对土壤微生物群落功能多样性的影响·····	时 鹏,高 强,王淑平,等 (6173)
茶园 4 种半翅目主要害虫与其捕食性天敌的关系·····	周夏芝,毕守东,柯胜兵,等 (6183)
采煤塌陷地不同施肥处理对土壤微生物群落结构的影响·····	李金岚,洪坚平,谢英荷,等 (6193)
典型区域果园表层土壤 5 种重金属累积特征·····	杨世琦,刘国强,张爱平,等 (6201)
工业园区氮代谢——以江苏宜兴经济开发区为例·····	武娟妮,石 磊 (6208)
公路绿化带对路旁土壤重金属污染格局的影响及防护效应——以山西省主要公路为例·····	王 慧,郭晋平,张芸香,等 (6218)
奥运期间北京 PM _{2.5} 、NO _x 、CO 的动态特征及影响因素 ·····	曾 静,廖晓兰,任玉芬,等 (6227)
新疆绿洲农田土壤-棉花系统 9 种矿质元素生物循环特征 ·····	韩春丽,刘 娟,张旺锋,等 (6234)
甘肃省黄土高原旱作玉米水分适宜性评估·····	姚小英,蒲金涌,姚茹莘,等 (6242)
基于粪便 DNA 的马鹿种群数量和性比 ·····	田新民,张明海 (6249)
专论与综述	
水生态功能分区研究中的基本问题·····	唐 涛,蔡庆华 (6255)
土壤水分遥感监测研究进展·····	杨 涛,官辉力,李小娟,等 (6264)
中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施·····	邓振镛,王 强,张 强,等 (6278)
问题讨论	
城市物质流分析框架及其指标体系构建·····	陈 波,杨建新,石 焱,等 (6289)
研究简报	
湖南会同不同退耕还林模式初期碳密度、碳贮量及其空间分布特征 ·····	田大伦,尹刚强,方 晰,等 (6297)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 300 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 32 * 2010-11

湖南会同不同退耕还林模式初期碳密度、 碳贮量及其空间分布特征

田大伦^{1,2,3,*}, 尹刚强^{1,4}, 方 晰^{1,2,3}, 项文化^{1,2,3}, 闫文德^{1,2,3}

(1. 中南林业科技大学生态研究室, 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004;
3. 国家野外科学观测研究站, 会同 418307; 4. 国家林业局, 北京 100714)

摘要:对湖南会同 5 种退耕还林模式初期森林生态系统碳密度、碳贮量及其空间分布特征进行了研究。结果表明:主要造林树种马尾松、樟树、杜英、乐昌含笑、红花木莲不同器官的平均碳密度分别为:0.5296、0.5188、0.5178、0.5376、0.5355 gC/g, 树种间同一器官的平均碳密度排序为:树干 > 树根 > 树叶 > 树枝 > 树皮; 5 种退耕还林模式中活地被物层、死地被物层碳密度分别介于 0.4380—0.5380 gC/g、0.5060—0.5200 gC/g 之间, 土壤层(0—60 cm, 下同)平均有机碳密度介于 0.00786—0.01485 gC/g 之间; 退耕还林 3a 后, 乐昌含笑 × 红花木莲混交林、杜英 × 乐昌含笑混交林、杜英 × 樟树混交林、樟树林土壤层有机碳密度比原坡耕地分别提高了 53.57%、39.19%、38.57%、24.82%, 而马尾松林地下下降了 18.72%。林木不同器官中的碳贮量基本上与各器官的生物量成正比例, 同一造林时间的 4 种模式中, 以杜英 × 樟树混交林各器官的碳贮量最大, 为 1.219 tC/hm², 杜英 × 乐昌含笑混交林最小, 仅为 0.199 tC/hm², 均以干根碳贮量为最大, 占其各器官碳贮量的 57.50% 以上。5 种退耕还林模式恢复初期的生态系统中, 土壤层碳贮量最大, 为 74.518—119.312 tC/hm², 占 96.180% 以上, 植被层为其次, 在 0.633—2.960 tC/hm² 之间, 仅占 0.642%—3.820%, 死地被物层为最小。退耕后, 樟树林、杜英 × 樟树混交林、乐昌含笑 × 红花木莲混交林、杜英 × 乐昌含笑混交林生态系统碳贮量分别增加了 19.477、27.722、41.643、26.821 tC/hm², 马尾松林下降了 1.675 tC/hm²。

关键词:湖南会同; 退耕还林; 碳密度; 碳贮量

Carbon density, storage and spatial distribution under different ‘Grain for Green’ patterns in Huitong, Hunan Province

TIAN Dalun^{1,2,3,*}, YIN Gangqiang^{1,4}, FANG Xi^{1,2,3}, XIANG Wenhua^{1,2,3}, YAN Wende^{1,2,3}

1 Research Section of Ecology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 State Key Laboratory of Ecological Applied technology in Forest Area of South China, Changsha 410004, China

3 National Field Station for Scientific Observation and Experiment, Huitong 418307, China

4 State Forestry Administration, Beijing 100714, China

Abstract: Carbon density, storage and spatial distribution in young stands within five afforestation patterns following the ‘Grain for Green’ program (GGP, i. e., conversion of farmland to forests) were investigated in Huitong County, Hunan Province. The five afforestation patterns included *Pinus massoniana* pure forests, *Cinnamomum camphora* pure forests, *Michelia chapensis* and *Manglietia insignis* mixed forests, *Elaeocarpus sylvestris* and *Michelia chapensis* mixed forests, and *Elaeocarpus sylvestris* and *Cinnamomum camphora* mixed forests. The results showed that the mean carbon densities of all organs were 0.5296, 0.5188, 0.5178, 0.5376, and 0.5355 gC/g for the tree species *Pinus massoniana*, *Cinnamomum camphora*, *Elaeocarpus sylvestris*, *Michelia chapensis*, and *Manglietia insignis*, respectively. The average carbon densities in different organs of the five tree species ranked in the order as: trunk > root > leaf > branch > bark. Carbon densities ranged from 0.4380 to 0.5380 gC/g, 0.5060 to 0.5200 gC/g and 0.00786 to 0.01485 gC/g in living-understory layer, litterfall layer and soil layer (0—60 cm depth), respectively within the five afforestation patterns. Three years later after

基金项目:科技部公益性研究项目(2007415); 国家野外科学观测研究站项目(20060515, 20070822); 国家林业局软科学项目(2007R23)

收稿日期:2009-12-16; **修订日期:**2010-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csuftld@126.com

the conversion of farmland to forests, soil organic carbon density was increased 53.6%, 39.2%, 38.6%, and 24.8% in *Michelia chapensis* and *Manglietia insignis* mixed forests, *Elaeocarpus sylvestris* and *Michelia chapensis* mixed forests, *Elaeocarpus sylvestris* and *Cinnamomum camphora* mixed forests and *Cinnamomum camphora* forests, but decreased 18.7% in *Pinus massoniana* forest when compared with pre-converted farmland. Carbon storage in different organs was positively related to the biomass of these respective organs. It was found that *Elaeocarpus sylvestris* and *Cinnamomum camphora* mixed forest had the highest carbon stocks in the tree biomass pools (1.22 tC/hm^2), while *Elaeocarpus sylvestris* and *Michelia chapensis* mixed forest had the lowest value (0.20 tC/hm^2). Trunk and root stored more carbon than other organs, and the two organs accounted for 57.5% of the total carbon storage in all tree organs. At the early stage of the five forested ecosystems, the soil layer (0–60 cm) had the largest carbon storage, ranging from 74.52 to 119.31 tC/hm^2 , and accounted for more than 96.2% of the total carbon storage in the ecosystems. Carbon storage in the plant layer ranged from 0.63 to 2.96 tC/hm^2 , which accounted for 0.64 to 3.8% of the total carbon storage of the ecosystems. The litterfall layer had the smallest proportion of the carbon storage within the ecosystems. After conversion of farmland to forestland, the carbon storage was increased 19.48, 27.72, 41.64, 26.82 tC/hm^2 in *Cinnamomum camphora* pure forests, *Cinnamomum camphora* and *Elaeocarpus sylvestris* mixed forests, *Michelia chapensis* and *Manglietia insignis* mixed forests, *Elaeocarpus sylvestris* and *Michelia chapensis* mixed forests, respectively, but decreased 1.68 tC/hm^2 in *Pinus massoniana* pure forests. Our results indicated that ‘Grain for Green’ program, especially in the patterns of farmland to mixed forests, had great potential to enhance carbon sequestration in terrestrial ecosystems of southern China.

Key Words: Huitong County of Hunan Province; ‘Grain for Green’ program; Carbon density; Carbon storage

为了控制大气中温室气体浓度上升的趋势,减缓全球气候变暖,国际社会正在采取 2 项重要战略措施:一是直接减排,即通过技术改造,提高能源利用效率,减少温室气体排放;二是间接减排,即通过以森林为主体的生物吸收和固定 CO_2 ,减少大气中温室气体浓度。森林是一个潜在的巨大碳库,具有明显的碳汇功能^[1-3]。研究表明,在中高纬度地区由于森林的恢复和再生长每年约能固持 0.7 PgC ^[4]。造林即将草地或者弃耕农田转变成森林的一种土地利用方式,已成为许多国家减排增汇的一项重要措施^[5-6]。退耕还林工程是中国在 1998 年推行的一项旨在恢复森林植被、解决水土流失等生态环境问题,促进人类社会可持续发展的重大举措,具有现实的时代意义,预计项目完成后退耕还林面积将达 3328 万 hm^2 ^[7]。这是一个规模较大的土地利用变化项目,将产生新的森林生态系统,研究其碳密度、贮量的空间分布将有助于准确估算中国森林植被碳汇能力及其变化,对于正确认识退耕还林这一土地覆盖变化的环境效应具有重要的意义。自实施退耕还林(工程)以来,国内许多学者对我国的退耕还林技术、模式、植被恢复水土保持、土壤有机碳储量的变化等生态效益方面开展了相关的研究^[8-12]。但有关同一造林地上不同退耕还林模式下生态系统的碳密度、碳贮量及其空间分布特征的研究仍极少,国内仅有吴小山等^[13]、黄从德等^[14]报道了四川洪雅县退耕还林初期的桦木林、苦竹林生态系统碳密度、贮量与空间分布进行了研究。为此,本文对湖南会同退耕还林工程中同一造林地不同造林模式植被恢复初期的碳密度、碳贮量及其空间分布特征进行比较研究,旨在为我国乃至全球森林生态系统碳平衡估算和退耕还林生态效益评价提供基础数据,同时也为我国退耕还林政策的制订提供科学依据。

1 试验地概况

试验区位于湖南省会同县内,地处云贵高原东缘和雪峰山脉西南部,地理位置为 $109^\circ 26' - 110^\circ 8' \text{ E}$ 和 $26^\circ 40' - 27^\circ 9' \text{ N}$ 之间,气候属典型亚热带湿润季风气候。年均温度 16.6°C ,年均降水量 1265 mm ,年均日照时数 1445.3 h ,年均太阳总辐射量 101.2 kJ/cm^2 ,年均蒸发量 1148.3 mm ,年均相对湿度 80%,海拔高度 300—500m,相对高度为 150m 以下,为低山丘陵地貌类型。土壤系震旦纪板溪系灰绿色板岩发育的山地黄壤,质地细,介于轻壤与中粘壤之间,表土褐色至淡黄橙色,心土为橙黄色,有机质含量在 $10 - 30 \text{ g/kg}$ 之间,pH 值 $4.8 - 5.7$ 。地带性植被为常绿阔叶林,以壳斗科(*Fagaceae*)的常绿树种如栲属(*Castanopsis*)、青冈属

(*Cyclobalanopsis*)、石栎属(*Lithocarpus*)为建群种,其次为樟科(*Lauraceae*)的樟属(*Cinnamomum*)、楠木属(*Phoebe*);山茶科(*Theaceae*)的木荷属(*Schima*)、山茶属(*Camellia*)以及木兰科(*Magnoliaceae*)、金缕梅科(*Hamamelidaceae*)、杜英科(*Elaeocarpaceae*)的一些树种组成。

2 研究方法

2.1 样地设置

2007 年 5 月,在会同县连山乡退耕还林工程实施点 1km² 范围内,根据典型性和代表性原则分别在坡向、坡度、坡位和海拔高度基本一致,选择了 5 种退耕还林模式:马尾松(*Pinus massoniana*)林、樟树(*Cinnamomum camphora*)林、杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)×樟树(*Cinnamomum camphora*)混交林、乐昌含笑(*Michelia chapensis*)×红花木莲(*Manglietia insignis*)混交林、杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)×乐昌含笑(*Michelia chapensis*)混交林,为了能准确地描述 5 种退耕还林模式的林分特征,分别在设置面积为 20m×20m 标准样地中的 1 块,进行每木调查,5 种退耕还林模式林分基本特征如表 1 所示。

表 1 不同退耕还林模式的林分特征
Table 1 Stands characteristics of some afforestation models of returning land for farming to forestry project in Huitong

造林模式 Afforestation pattern	造林时间 Afforestation time/a	造林密度 Afforestation density /(株/hm ²)	2007 年林分密度 Stands density in 2007 /(株/hm ²)	平均树高 Average height /m	平均胸径/地径 Average DBH /cm
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> stand	2001	3333	2425	2.01	6.10
樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> stand	2004	3333	1075	2.20	3.32
杜英×樟树混交林 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> and <i>Cinnamomum camphora</i> mixed stand	2004	3333	1975(300)	2.28(2.22)	3.64(3.57)
乐昌含笑×红花木莲混交林 <i>Michelia chapensis</i> and <i>Manglietia insignis</i> mixed stand	2004	3333	1381(1003)	0.95(1.10)	2.10(2.10)
杜英×乐昌含笑混交林 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> and <i>Michelia chapensis</i> mixed stand	2004	3333	1275(1175)	1.12(1.10)	2.10(2.00)

① 括号外的数据表示混交林中前一树种的数据,括号内的数据表示后一树种的数据

2.2 生物量测定

根据胸径或地径、树高等测树因子的测定结果,在 5 种退耕还林模式的标准样地内分别按林木生长优势、中等、较差选择标准样木,采用收获法测定林分生物量。其中,马尾松林选取 5 株,樟树林选取 6 株,杜英×樟树混交林选取杜英、樟树各 6 株,乐昌含笑×红花木莲混交林选取乐昌含笑、红花木莲各 2 株,杜英×乐昌含笑混交林选取杜英、乐昌含笑各 2 株。分层截取实测标准木的干、枝、叶、皮和根等组分的鲜重,同时分别采集各组分的分析样品,在室置于 80℃ 恒温箱中烘至恒重,求出含水量,将各个组分的鲜重换算成干重。按公式 $W_{总} = W_{干} + W_{枝} + W_{叶} + W_{皮} + W_{根}$ 计算样木各组分的生物量。用相对生长法建立生物量与胸径(D)、树高(H)的回归方程。

马尾松的生物量与胸径(D)、树高(H)的回归方程为:

$$\begin{aligned} W_{干} &= 13.797(D^2H)^{1.2969} & (R^2 = 0.8563) \\ W_{枝} &= 70.078(D^2H)^{0.8510} & (R^2 = 0.7476) \\ W_{叶} &= 91.145(D^2H)^{0.7007} & (R^2 = 0.9780) \\ W_{皮} &= 7.5413(D^2H)^{1.1178} & (R^2 = 0.8969) \\ W_{根} &= 24.634(D^2H)^{0.9687} & (R^2 = 0.6815) \end{aligned}$$

樟树的生物量与胸径(D)、树高(H)的回归方程为:

$$W_{\text{干}} = 20.583(D^2H)^{1.069} \quad (R^2 = 0.9775)$$

$$W_{\text{枝}} = 33.366(D^2H)^{0.6806} \quad (R^2 = 0.6866)$$

$$W_{\text{叶}} = 29.959(D^2H)^{0.8664} \quad (R^2 = 0.7038)$$

$$W_{\text{皮}} = 4.6996(D^2H)^{1.1397} \quad (R^2 = 0.9501)$$

$$W_{\text{根}} = 26.789(D^2H)^{0.9108} \quad (R^2 = 0.9348)$$

杜英的生物量与胸径(D)、树高(H)的回归方程为:

$$W_{\text{干}} = 126.55(D^2H)^{0.4929} \quad (R^2 = 0.9691)$$

$$W_{\text{枝}} = 36.356(D^2H)^{0.5317} \quad (R^2 = 0.7810)$$

$$W_{\text{叶}} = 51.924(D^2H)^{0.5559} \quad (R^2 = 0.9892)$$

$$W_{\text{皮}} = 23.391(D^2H)^{0.3742} \quad (R^2 = 0.9596)$$

$$W_{\text{根}} = 84.776(D^2H)^{0.4974} \quad (R^2 = 0.9805)$$

用回归方程估算马尾松林、樟树林和杜英×樟树混交林林木和林分的生物量。由于乐昌含笑×红花木莲混交林、杜英×乐昌含笑混交林只测定了地径,故不能通过建立相对生长方程 $W = a(D^2H)$ 估算其林分生物量,只能通过标准木的平均生物量乘以林分株数估算出整个林分的生物量。

同时,在5种退耕还林模式的标准样地内均按梅花形分别设置4个面积为1m×1m的小样方,测定林下地被物层的生物量。对每小样方内的植物种类进行记录,采用全挖法实测其鲜重,灌木分叶、茎、根,草本植物分地上部分和地下部分,取同种植物相同器官的混合样品烘干至恒重后再估算其干重,同时用作分析样品。死地被物层全部测定生物量,取混合样品,测定含水量再估算其干重,同时用作分析样品。

2.3 土壤样品的采集、处理与分析方法

为了采集代表性的土壤分析样品,5种退耕还林模式除了各设置1块标准样地进行每木调查外,另在标准样地附近分别设置了3块试验样地(均为20m×20m)和相同条件下未进行退耕还林的坡耕地(主要种植西瓜、萝卜、油菜等旱生农作物)样地2块(均为20m×20m),分别按梅花形布点3—4个,为了便于比较5种退耕还林模式土壤碳密度及其碳储量均按0—15 cm、15—30 cm、30—45 cm、45—60 cm 分层分别采集土壤样品,按测定指标的要求进行处理。同时用环刀法测定土壤容重,根据土壤容重计算各土层单位面积土壤质量。植物分析样品在105℃恒温条件下进行杀青10—30 min,然后在80℃下烘至恒重,粉碎处理备用。

植物、土壤样品中的有机碳密度采用重铬酸钾—水合加热法测定^[15]。

2.4 数据处理

应用 EXCEL、SPSS(Statistical Package for Social Science)10.0 软件包中的均数比较分析、方差分析、相关分析等方法对数据进行统计分析与处理。

3 结果与分析

3.1 主要造林树种各器官的碳密度

从表2可以看出,不同树种内各器官的平均碳密度不同,由高至低的排序为:乐昌含笑(0.5376 gC/g) > 红花木莲(0.5355 gC/g) > 马尾松(0.5296 gC/g) > 杜英(0.5188 gC/g) > 樟树(0.5178 gC/g),但不同树种两两之间的差异不显著($P > 0.05$)。表明同一地区不同树种平均碳密度存在一定的差异,且针叶树(马尾松)的平均碳密度仅略低于部分阔叶树(乐昌含笑、红花木莲),而高于樟树、杜英,种内不同器官碳密度的标准差变化范围为0.03—0.07之间。同一树种的平均碳密度及各器官的碳密度在不同造林模式中几乎没有差异,如樟树的平均碳密度在杜英×樟树混交林中为0.5178 gC/g,在樟树林中为0.5179 gC/g,杜英的平均碳密度在杜英×樟树混交林中为0.5188 gC/g,在杜英×乐昌含笑混交林中为0.5189 gC/g,乐昌含笑的平均碳密度在杜英×乐昌含笑混交林中为0.5376 gC/g,在乐昌含笑×红花木莲混交林中为0.5387 gC/g。表明同一树种的

平均碳密度在同一地区不因造林模式的不同而产生差异,即树种的碳密度与造林模式无关。

由表 2 可知,树种间同一器官平均碳密度以树干的最高,为 0.5684 gC/g,且与其它器官之间的差异达到显著水平($P < 0.05$),树根为其次,树皮最低,仅为 0.4348 gC/g,树根与树皮的差异达到显著水平($P < 0.05$),但树根与树枝、树叶间的差异不显著($P > 0.05$),种间同一器官的碳密度标准差在 0.03—0.05 之间。不同树种同一器官的碳密度存在一定的差异。基本趋势大致为:①树干中,樟树 > 杜英 > 乐昌含笑 > 红花木莲 > 马尾松,且马尾松与其它 4 种树种的差异达到显著水平($P < 0.05$),但樟树、杜英、乐昌含笑、红花木莲两两间的差异不显著($P > 0.05$)。②树枝中,杜英 > 乐昌含笑 > 马尾松 > 红花木莲 > 樟树,但两两之间的差异不显著($P > 0.05$)。③树叶中,樟树 > 乐昌含笑 > 马尾松 > 红花木莲 > 杜英,且樟树、乐昌含笑、马尾松与红花木莲、杜英之间的差异显著($P < 0.05$),但樟树、乐昌含笑、马尾松之间,红花木莲、杜英之间的差异不显著($P > 0.05$)。④树根中,红花木莲 > 马尾松 > 樟树 > 杜英 > 乐昌含笑,但两两之间的差异不显著($P > 0.05$)。可见,不同树种同一器官中碳密度的高低分布并不呈现出一定的规律性,这可能与各树种的生物学特性有关,马尾松各器官(除树干外)的碳密度普遍较高。

表 2 主要树种各器官的碳密度

Table 2 Carbon density in different organs of different tree species /(gC/g)

造林模式 Afforestation pattern	树种 Tree species	干 Trunk	枝 Branch	叶 Leaf	皮 Bark	根 Root	种内平均 Average within species
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> stand	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0.5383 (0.02) aA	0.5291 (0.03) aA	0.5404 (0.05) aA	0.4674 (0.04) aB	0.5436 (0.02) aA	0.5296 (0.04) a
樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> stand	樟树 <i>innamomum camphora</i>	0.5927 (0.02) bA	0.4868 (0.03) bC	0.5628 (0.03) aA	0.4059 (0.02) bD	0.5342 (0.03) aB	0.5179 (0.07) a
杜英 × 樟树混交林 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> and <i>Cinnamomum camphora</i> mixed stand	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	0.5925 (0.02) bA	0.4864 (0.02) bC	0.5626 (0.02) aA	0.4060 (0.02) bD	0.5342 (0.01) aB	0.5178 (0.05) a
	杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i>	0.5826 (0.03) bA	0.5332 (0.02) aB	0.4765 (0.02) bC	0.4305 (0.03) bC	0.5318 (0.05) aB	0.5188 (0.06) a
杜英 × 乐昌含笑混交林 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> and <i>Michelia chapensis</i> mixed stand	杜英 <i>laeocarpus sylvestris</i>	0.5830 (0.02) bA	0.5334 (0.03) aB	0.4756 (0.01) bC	0.4325 (0.02) bC	0.5314 (0.04) aB	0.5189 (0.05) a
	乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i>	0.5656 (0.02) bA	0.5267 (0.01) aA	0.5428 (0.01) aA	—	0.5273 (0.02) aA	0.5376 (0.03) a
乐昌含笑 × 红花木莲混交林 <i>Michelia chapensis</i> and <i>Manglietia insignis</i> mixed stand	乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i>	0.5661 (0.02) bA	0.5291 (0.02) aA	0.5417 (0.01) aA	—	0.5282 (0.04) aA	0.5387 (0.03) a
	红花木莲 <i>anglietia insignis</i>	0.5493 (0.04) bB	0.5083 (0.02) bA	0.4804 (0.05) bA	—	0.5733 (0.01) aB	0.5355 (0.05) a
种间平均 Average between species		0.5684 (0.03) A	0.5185 (0.03) B	0.5264 (0.05) B	0.4348 (0.04) C	0.5375 (0.04) B	

① 括号内的数据为标准差,同一列相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$),不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$);同一行相同大写字母表示差异不显著($P > 0.05$),不同大写字母表示差异显著($P < 0.05$)

由表 2 还可知,同一树种不同器官的碳密度也不同。马尾松根(0.5436gC/g) > 叶(0.5404gC/g) > 干(0.5383gC/g) > 枝(0.5291gC/g) > 皮(0.4674gC/g),干、枝、叶、根之间的差异不显著($P > 0.05$),但干、枝、叶、根与树皮之间的差异均达到显著性水平($P < 0.05$);樟树干(0.5927gC/g) > 叶(0.5628 gC/g) > 根(0.5346gC/g) > 枝(0.4868gC/g) > 皮(0.4059gC/g),除干、叶之间的差异不显著($P > 0.05$)外,其它各器官

之间的差异显著($P < 0.05$);杜英干(0.5826 gC/g) > 枝(0.5334gC/g) > 根(0.5318 gC/g) > 叶(0.4756gC/g) > 皮(0.4305gC/g),各器官的差异显著($P < 0.05$);乐昌含笑干(0.5656 gC/g) > 叶(0.5417gC/g) > 根(0.5273gC/g) > 枝(0.5267gC/g),各器官的差异不显著($P < 0.05$);红花木莲根(0.5733gC/g) > 干(0.5493gC/g) > 枝(0.5083gC/g) > 叶(0.4804gC/g),干与根之间、枝与叶之间的差异不显著($P > 0.05$),但干、根与枝、叶之间的差异显著($P < 0.05$)。

3.2 林下地被物层的碳密度

林下地被物层作为林地土壤养分的重要载体,林地土壤有机质和养分的主要补给者,在缓解土壤酸碱度、维持土壤肥力和促进森林生态系统正常的生物循环和养分平衡等方面起着重要作用^[16-18],同时也是重要的碳库。由表 3 可知,不同退耕还林模式下的活地被物平均碳密度存在一定的差异,从高至低的排序为:杜英 × 樟树混交林(0.5380 gC/g) > 马尾松林(0.4940 gC/g) > 杜英 × 乐昌含笑混交林(0.4680 gC/g) > 乐昌含笑 × 红花木莲混交林(0.4380 gC/g),是由于不同造林模式下活地被物的物种组成不同所引起的,樟树林下几乎没有其它植物种类。同样,不同退耕还林模式的死地被物层的平均碳密度的排序为:杜英 × 乐昌含笑混交林(0.5200 gC/g) > 乐昌含笑 × 红花木莲混交林(0.5060 gC/g),可能也是由于不同退耕还林模式凋落物的数量、组成、分解的难易程度不同所引起的。如乐昌含笑是落叶阔叶树种,而红花木莲、杜英、樟树是常绿阔叶树种,马尾松是常绿针叶树种,在 2007 年 5 月份测定时,马尾松林、樟树林、杜英 × 樟树混交林地表几乎没有凋落物存在,因此本文未对其死地被物层的碳密度进行分析。林下活地被物碳密度标准差的变化范围为 0.18—0.26 之间,死地被物为 0.10—0.23 之间。

表 3 林下地被物层的碳密度
Table 3 Carbon density in under-stratum ground cover, litter amount/(gC/g)

造林模式 Afforestation pattern	活地被物层 the ground cover layer	死地被物层 the litter layer
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> stand	0.4940(0.21)	—
杜英 × 樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> stand	0.5380(0.24)	—
杜英 × 乐昌含笑林 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> and <i>Michelia chapensis</i> mixed stand	0.4680(0.26)	0.5200(0.10)
乐昌含笑 × 红花木莲林 <i>Michelia chapensis</i> and <i>Manglietia insignis</i> mixed stand	0.4380(0.18)	0.5060(0.23)

① 括号内的数据为标准差

3.3 不同退耕还林模式土壤的碳密度

土壤有机碳(SOC)的数量和质量直接影响着林地土壤理化性质和生物学特征,在维持土壤质量、控制养分和污染物的生物有效性中起着重要的作用。为此,土壤中的有机碳常被选作土壤肥力评价的重要指标,用以综合反映土壤的生产、环境和健康状况^[19-20]。土壤有机碳密度的高低受土地的利用方式、植被每年的凋落物量及其分解速率、土壤深度等的影响。从表 4 可以看出,5 种退耕还林模式下土壤层(0—60cm)平均有机碳密度不同,由高至低排序为:乐昌含笑 × 红花木莲混交林(0.01485gC/g) > 杜英 × 乐昌含笑混交林(0.01346gC/g) > 杜英 × 樟树混交林(0.01340gC/g) > 樟树林(0.01207gC/g) > 马尾松林(0.00786 gC/g)。与对照地(0.00967 gC/g)相比,乐昌含笑 × 红花木莲混交林地、杜英 × 乐昌含笑混交林地、杜英 × 樟树混交林地、樟树林地分别提高了 53.57%、39.19%、38.57%、24.82%,但马尾松林地下降了 18.72%。

由表 4 可知,同一土层有机碳密度也存在明显的差异。在 0—15cm 土层中,乐昌含笑 × 红花木莲混交林最高,达 0.01705 gC/g,樟树林为其次,0.01639 gC/g,马尾松林最低,仅为 0.01047 gC/g,与对照地(0.01489 gC/g)相比,乐昌含笑 × 红花木莲混交林地、樟树林地、杜英 × 樟树混交林地分别提高了 14.51%、10.07%、3.43%,马尾松林地、杜英 × 乐昌含笑混交林地分别下降了 29.68%、3.29%。在 15—30cm 土层中,乐昌含笑 × 红花木莲混交林最高,达 0.01749 gC/g,杜英 × 樟树混交林为其次,0.01587 gC/g,马尾松林最低,仅为 0.00752 gC/g,与对照地(0.01184 gC/g)相比,乐昌含笑 × 红花木莲混交林地、杜英 × 樟树混交林地、杜英 × 乐昌含笑混交林地、樟树林地分别提高了 47.72%、34.04%、33.95%、0.17%,马尾松林地下降了 36.49%。

在 30—45cm 土层中有机碳密度由高至低的排序为:杜英 × 乐昌含笑混交林(0.01427 gC/g) > 乐昌含笑 × 红花木莲混交林(0.01334 gC/g) > 杜英 × 樟树混交林(0.01194 gC/g) > 樟树林(0.01025 gC/g) > 马尾松林(0.00698 gC/g),与对照地(0.00652 gC/g)相比,各退耕还林模式的碳密度均有所提高,其中提高幅度最大的是杜英 × 乐昌含笑混交林,为 118.87%,马尾松林提高幅度最小,为 7.06%,在 45—60cm 土层中为:乐昌含笑 × 红花木莲混交林(0.01150 gC/g) > 杜英 × 樟树混交林(0.01040 gC/g) > 樟树林(0.00976 gC/g) > 杜英 × 乐昌含笑混交林(0.00929 gC/g) > 马尾松林(0.00646 gC/g)与对照地(0.00541gC/g)相比,各退耕还林模式的碳密度均有所提高,其中提高幅度最大的是乐昌含笑 × 红花木莲混交林,为 112.57%,马尾松林提高幅度最小,为 19.41%。在各土层中,马尾松林有机碳密度与其它 4 种模式林地的差异均达到了显著性水平($P < 0.05$),除 15—30cm 土层外,乐昌含笑 × 红花木莲混交林,杜英 × 乐昌含笑混交林,杜英 × 樟树混交林,樟树林两两之间差异均不显著($P > 0.05$),表明混交林模式比纯林模式更有利于土壤有机碳的积累,阔叶纯林模式较针叶纯林模式有利于土壤有机碳的保存。

从表 4 还可以看出,5 种退耕还林模式下土壤有机碳密度均随土壤深度增加而下降,表土层(0—15cm)是底土层(45—60cm)碳密度的 1.48 倍以上,是因为地表上的枯枝落物和植物根系分解所形成的有机碳首先进入土壤表层,从而使得表层土壤的有机碳含量明显高于深层土壤。Jobbagy 研究指出,植物根系的分布直接影响土壤中有机碳的垂直分布,因为大量死根的腐解归还为土壤提供了丰富的碳源^[21]。

表 4 不同造林模式下土壤的有机碳密度

Table 4 Carbon density of soil in different afforestation patterns/ (gC/g)

深度 Soil depth /cm	马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> stand	樟树林 <i>Cinnamomum</i> <i>camphora</i> stand	杜英 × 樟树林 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> and <i>Cinnamomum</i> <i>camphora</i> mixed stand	杜英 × 乐昌含笑林 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> and <i>Michelia</i> <i>chapensis</i> mixed stand	乐昌含笑 × 红花木莲林 <i>Michelia chapensis</i> and <i>Manglietia</i> <i>insignis</i> mixed stand	对照地 Control
0—15	0.01047 (0.004) a	0.01639 (0.005) b	0.01540 (0.003) b	0.01440 (0.005) b	0.01705 (0.003) b	0.01489 (0.004) b
15—30	0.00752 (0.004) a	0.01186 (0.005) b	0.01587 (0.002) c	0.01586 (0.005) c	0.01749 (0.003) c	0.01184 (0.002) b
30—45	0.00698 (0.004) a	0.01025 (0.005) b	0.01194 (0.002) b	0.01427 (0.004) b	0.01334 (0.003) b	0.00652 (0.003) a
45—60	0.00646 (0.004) a	0.00976 (0.005) b	0.01040 (0.002) b	0.00929 (0.004) b	0.01150 (0.003) b	0.00541 (0.003) a
平均值 Mean	0.00786a	0.01207b	0.01340b	0.01346b	0.01485b	0.00967c

① 括号内的数据是样本标准差,同一行相同字母表示差异不显著($P > 0.05$),不相同字母的表示差异显著($P < 0.05$)

3.4 林分各器官碳贮量

林分现存量中各器官的生物量与其相应碳密度之积,即为林分各器官的碳贮量。从表 5 可以看出,碳在林木不同器官中的分配,基本上与各器官的生物量成正比例关系。马尾松林各器官的总碳贮量最大,为 1.472 tC/hm²,这与马尾松林造林时间早,生物量大有关。同一时间造林的其他 4 种模式中,造林密度均为 3333 株/hm²,但各器官的总碳贮量也不同,其中杜英 × 樟树混交林各器官的总碳贮量最大,为 1.219 tC/hm²,樟树林为其次,为 0.633 tC/hm²,杜英 × 乐昌含笑混交林最小,仅为 0.199 tC/hm²。不同造林模式中,林分各器官的碳贮量不同。马尾松林分中,枝叶的碳贮量最大,为 0.897 tC/hm²,占其各器官总碳贮量的 60.93%,但其它 4 种造林模式中,均以干根碳贮量为最大,樟树林为 0.364 tC/hm²,占其各器官总碳贮量的 57.50%,杜英 × 樟树林为 0.844tC/hm²,占 69.24%,乐昌含笑 × 红花木莲混交林为 0.158 tC/hm²,占 61.96%,杜英 × 乐昌含笑混交林为 0.130 tC/hm²,占 66.83%。

从表 5 可知,综合马尾松林、樟树林、杜英 × 樟树混交林、乐昌含笑 × 红花木莲混交林、杜英 × 乐昌含笑混交林各器官生物量与碳贮量总转换系数分别为 0.5261 (1.472/2.798)、0.5218、0.5209、0.5269、0.5279,因而

有专家提出森林植被的碳贮量可用生物量乘以 0.45—0.50 来估算的观点,对退耕还林中马尾松林、樟树林、杜英×樟树混交林、乐昌含笑×红花木莲混交林、杜英×乐昌含笑混交林分碳贮量的估算可能会引起计算结果偏低。

表 5 林分各器官的碳贮量
Table 5 Carbon storage in different organs / (t/hm²)

造林模式 Afforestation pattern	干 Trunk	枝 Branch	叶 Leaf	皮 Bark	根 Root	总和 Total
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> stand	0.213 (0.398)	0.395 (0.746)	0.502 (0.883)	0.136 (0.305)	0.256 (0.466)	1.472 (2.798)
樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> stand	0.203 (0.344)	0.095 (0.195)	0.165 (0.288)	0.039 (0.096)	0.161 (0.29)	0.633 (1.213)
杜英×樟树林 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> and <i>Cinnamomum camphora</i> mixed stand	0.510 (0.858)	0.154 (0.296)	0.226 (0.450)	0.06 (0.138)	0.334 (0.598)	1.219 (2.340)
杜英×乐昌含笑林 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> and <i>Michelia chapensis</i> mixed stand	0.073 (0.135)	0.032 (0.061)	0.037 (0.074)	—	0.057 (0.106)	0.199 (0.377)
乐昌含笑×红花木莲林 <i>Michelia chapensis</i> and <i>Manglietia insignis</i> mixed stand	0.081 (0.158)	0.045 (0.087)	0.054 (0.102)	—	0.077 (0.138)	0.255 (0.484)

① 括号内的数据是生物量

3.5 生态系统中碳贮量的空间分布特征

从表 6 看出,5 种退耕还林模式恢复初期的森林生态系统中,土壤层(0—60cm)碳贮量最大,植被层为其次,死地被物层为最小或因植被恢复初期没有形成枯枝落叶层而忽略不计。马尾松林生态系统碳贮量为 77.478 tC/hm²,其中土壤层为 74.518 tC/hm²,占 96.180%,植被层为 2.960 tC/hm²,仅占 3.820%。樟树林生态系统碳贮量为 98.630 tC/hm²,其中土壤层为 97.997 tC/hm²,占 99.358%,植被层(乔木层)仅为 0.633 tC/hm²,占 0.642%。杜英×樟树混交林生态系统碳贮量为 106.875 tC/hm²,其中土壤层为 104.827 tC/hm²,占 98.084%,植被层为 2.048 tC/hm²,占 1.917%。乐昌含笑×红花木莲混交林生态系统碳贮量为 120.796tC/hm²,其中土壤层为 119.312 tC/hm²,占 98.771%,植被层为 1.231 tC/hm²,仅占 1.039%,死地被物层为 0.253tC/hm²,占 0.209%。杜英×乐昌含笑混交林生态系统碳贮量为 105.974tC/hm²,其中土壤层为 104.548 tC/hm²,占 98.654%,植被层为 1.183 tC/hm²,仅占 1.117%,死地被物层为 0.243tC/hm²,占 0.229%。5 种退耕还林生态系统中土壤层碳贮量占到了生态系统总碳贮量的 95% 以上,且生态系统碳贮量的大小排序和土壤层碳贮量大小排序一致,均为乐昌含笑×红花木莲混交林>杜英×樟树混交林>杜英×乐昌含笑混交林>樟树林>马尾松林。表明土壤是森林生态系统中最为重要的碳库,土壤中碳贮量的变化必然引起整个区域生态系统碳贮量动态的变化。

4 结论与讨论

在湖南会同 5 种退耕还林模式中,马尾松、樟树、杜英、乐昌含笑、红花木莲不同器官的碳密度不同,变化范围分别为 0.4674—0.5436 gC/g、0.4159—0.5927 gC/g、0.4305—0.5334 gC/g、0.5273—0.5661 gC/g、0.4804—0.5733 gC/g,与我国苏南地区 18 年生国外松、27 年生杉木林、40 年栎林、湖南会同速生阶段杉木林不同器官的碳密度变化范围基本一致,大都在 0.45—0.55 gC/g 之间^[22-23]。有研究^[24]表明,针叶树种各组分的含碳率普遍高于阔叶树种,针叶树种各组分的平均含碳率也高于阔叶树和灌木树种。本研究中,不同树种内各器官的平均碳密度由高至低的排序为:乐昌含笑(0.5376 gC/g)>红花木莲(0.5355 gC/g)>马尾松(0.5296gC/g)>杜英(0.5188 gC/g)>樟树(0.5178 gC/g),不同树种两两之间的差异不显著($P>0.05$),马尾松的平均碳密度略低于乐昌含笑、红花木莲,而高于樟树、杜英,不同树种同一器官平均碳密度排序为树干>树根>树叶>树枝>树皮。

5 种退耕还林模式下活地被物层、死地被物层碳密度的变化范围分别为:0.4380—0.5380 gC/g、0.5060—0.5200gC/g,土壤层(0—60 cm)平均有机碳密度为:0.00786—0.01485 gC/g,土壤有机碳密度均随土壤深度

增加而下降。

表 6 生态系统中碳贮量的空间分布
Table 6 Spatial distribution of carbon storage in ecosystem

造林模式 Afforestation pattern	组分 Component	生物量或土重 Biomass or soil weight /(t/hm ²)	碳贮量 Carbon storage /(tC/hm ²)	碳贮量百分比 Carbon storage percentage/%
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> stand	植被层	5.772	2.960	3.820
	乔木层	2.798	1.472	1.899
	活地被物层	2.974	1.488	1.921
	死地被物层	—	—	—
	土壤层(0—60 cm)	9490.50	74.518	96.180
	合计		77.478	100
樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i> stand	植被层	1.213	0.633	0.642
	乔木层	1.213	0.633	0.642
	活地被物层	—	—	—
	死地被物层	—	—	—
	土壤层(0—60 cm)	8148.00	97.997	99.358
	合计		98.630	100
杜英×樟树林 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> and <i>Cinnamomum camphora</i> mixed stand	植被层	3.916	2.048	1.917
	乔木层	2.340	1.219	1.141
	活地被物层	1.576	0.829	0.776
	死地被物层	—	—	—
	土壤层(0—60 cm)	7906.50	104.827	98.084
	合计		106.875	100
杜英×乐昌含笑 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> and <i>Michelia chapensis</i> mixed stand	植被层	2.501	1.183	1.117
	乔木层	0.377	0.199	0.188
	活地被物层	2.124	0.984	0.929
	死地被物层	0.502	0.243	0.229
	土壤层(0—60 cm)	7792.50	104.548	98.654
	合计		105.974	100
乐昌含笑×红花木莲林 <i>Michelia chapensis</i> and <i>Manglietia insignis</i> mixed stand	植被层	2.616	1.231	1.039
	乔木层	0.484	0.255	0.211
	活地被物层	2.132	0.976	0.828
	死地被物层	0.468	0.253	0.209
	土壤层(0—60 cm)	8053.50	119.312	98.771
	合计		120.796	100
对照地 Control lands	土壤层(0—60 cm)	8778.20	79.153	100

研究表明,造林后土壤碳贮量变化受到许多因素影响,如当地的气候和土壤条件、造林前的土地利用历史和土壤准备、造林树种和人工林年龄等^[25-26]。在牧场中种植固氮树种和其它阔叶树种对土壤碳贮量影响很小,种植针叶树会明显降低土壤碳贮量^[27-28]。农田退耕还林初期土壤有机碳含量表现为下降的趋势,随着退耕耕年限的增加土壤有机碳含量逐渐恢复^[29]。青海省大通县北川河流域不同时间序列的退耕还林地土壤有机质含量明显高于坡耕地,3—10a 和 11—20a 退耕地 0—60cm 土壤有机质含量分别是坡耕地土壤有机质含量的 2.58 和 2.87 倍^[9]。黄土坡耕地不同退耕还林模式土壤有机碳含量显著增加 1.08—3.83 倍^[30]。中国西南喀斯特地区退耕 10a 后土壤有机碳含量明显增加^[10]。本研究中,湖南会同坡耕地退耕 3a 后,乐昌含笑×红花木莲混交林、杜英×乐昌含笑混交林、杜英×樟树混交林、樟树林土壤(0—60cm)碳密度比原坡耕地分别提高了 53.57%、39.19%、38.57%、24.82%,但马尾松林地土壤(0—60cm)下降了 18.72%。5 种退耕还林

模式中除马尾松林地土壤的碳贮量下降了 5.86% 外,樟树林地、杜英 × 樟树混交林地、乐昌含笑 × 红花木莲混交林地、杜英 × 乐昌含笑混交林地土壤碳贮量分别提高了 23.81%、32.44%、50.74%、32.08%。退耕后土壤有机碳含量的变化,其原因可能是农田退耕造林后土壤有机碳的输入量,土壤有机质的稳定性及影响有机碳分解的环境条件发生了改变^[31]。本研究中,马尾松林处于幼龄快速生长阶段,8 年生前基本没有凋落物归还土壤^[32],导致马尾松林土壤碳密度较未退耕的农用地明显下降(表 4),樟树每年 3、4 月份期间换叶,由于其叶质软容易分解,虽没有形成凋落物层,但增加了樟树林地、杜英 × 樟树混交林地土壤碳的输入量,乐昌含笑 × 红花木莲混交林地、杜英 × 乐昌含笑混交林地已形成了凋落物层,不但增加了林地土壤碳的输入量,而且有利于林地土壤碳的保存。因此,樟树林地、杜英 × 樟树混交林地、乐昌含笑 × 红花木莲混交林地、杜英 × 乐昌含笑混交林地土壤碳密度明显高于未退耕的农用地。土壤碳贮量决定于土壤容重与土壤碳密度的乘积,测定结果也表明未退耕的农用地土壤容重也较高于林地,从而导致不同退耕还林造林模式下土壤碳贮量发生不同的变化。可见,林地枯落物层对土壤碳贮量有较大的影响,因而在植被恢复过程中应加强生态系统管理,减少因人为干扰而导致土壤贮量的减少。据报道,土壤碳贮量取决于枯落物的供给与分解,如大兴安岭落叶松林凋落物现存量 42.8 t/hm²,其土壤(0—78 cm)碳贮量达 347.4 tC/hm²;下蜀次生栎林凋落物现存量 9.2 t/hm²,其土壤碳贮量仅为 69.7 tC·hm⁻²^[22]。湖南会同速生阶段杉木人工林凋落物现存量只有 1.975 t/hm²,其土壤碳贮量仅为 91.14 tC·hm⁻²^[23]。本研究结果也表明,马尾松林、樟树林、杜英 × 樟树混交林地表上几乎没有凋落物存在,乐昌含笑 × 红花木莲混交林、杜英 × 乐昌含笑混交林地表上调落物现存量分别仅为 0.468、0.502 t/hm²,其土壤碳贮量分别 119.312、104.548 tC/hm²,马尾松林、樟树林、杜英 × 樟树混交林地分别为 74.518、97.997、104.827 tC/hm²。

湖南会同实施退耕还林前后生态系统碳贮量发生了变化,退耕前坡耕地的碳贮量为 79.153 tC/hm²,退耕后的樟树林、杜英 × 樟树混交林、乐昌含笑 × 红花木莲混交林、杜英 × 乐昌含笑混交林生态系统碳贮量分别增加了 19.477、27.722、41.643、26.821 tC/hm²,而马尾松林下降了 1.675 tC/hm²。可见,同一地区的退耕还林工程中,采用不同退耕还林造林模式所形成的森林生态系统中碳贮量及其空间分布存在一定的差异,而混交林造林模式较纯林模式更有利于提高森林生态系统的碳贮量和固定更多的碳。

References:

- [1] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Sicentia Geographica Sinica*, 2004, 24(1): 50-54.
- [2] Fang J, Chen A, Peng C, Zhao S, Ci L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320-2322.
- [3] Zhang X O, Xu D Y. Potential carbon sequestration in China's forests. *Enviromental Science & Policy*, 2003, 6: 421-432.
- [4] Chen G S, Tian H Q. Land use/cover change effects on carbon cycling in terrestrial ecosystems. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2007, 31(2): 189-204.
- [5] Robert T, Watson I R, Noble B B. Land-Use Change and Forestry Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [6] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169: 137-147.
- [7] Li S D, Zhai H B. The comparison study on forestry ecological projects in the world. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1977-1982.
- [8] Zhang X Q, Hu T X, Li W, Gong Y B. Runoff and erosion analysis on different patterns of vegetation restoration and management on slope land in high precipitation area of western China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 27-33.
- [9] Li W Z, He Y Y, Zhang W H, Zhou X C. Evaluation of influence of changing slope farmland into forest and grassland on soil quality in beichuanhe watershed. *Research of Soil and Water Conservation Dec.*, 2005, 12(6): 1-3.
- [10] Long J, Deng Q Q, Jiang X R, Liu F. Effects of different de-farming and reafforestation patterns on changes of soil fertility quality in karst region of southwestern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1279-1284.

- [11] Wang C M, Liu Y H, Shao B, Zhao J G. Quantifying the soil carbon changes following the afforestation of former arable land. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(3): 112-119.
- [12] Chen L Z, Xiao W F, Tang W P, Pan L, Shi Y H. Study on soil organic carbon under several reafforestation patterns in the Three Gorges Reservoir Area. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(4): 111-114.
- [13] Wu X S, Huang C D. Carbon density, storage and distribution in birch forest ecosystem on the forestland converted from farm land. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(3): 323-326.
- [14] Huang C D, Zhang J, Deng Y L, Yang W Q. Carbon storage and allocation patterns of young forests converted by farmland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 130-133.
- [15] Tian D L. *Location Research Methods of Chinese Fir Plantation Ecosystems*. Beijing: Science Press, 2004.
- [16] Jiang Y X. Phytocenological role forest floor in subalpine fir forests in western sichuan province. *Acta Phytocologica Sinica*, 1981, 6(2): 89-98.
- [17] Zhang W R, Xu B T. Studies on structure and function of forest floors of mountain forest soils. *Acta Pedolog Sinica*, 1990, 27(2): 121-131.
- [18] Chen D Q. Studies on the decomposition of schima superba litter and on the law of it on the soil effect. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2001, 28(2): 86-88.
- [19] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of American Journal*, 2004, 68: 1945-1962.
- [20] Zhang H, Zhang G L, Qi Z P, Zhao Y G. Systematic assessment of soil quality at farm level in tropical area of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 186-193.
- [21] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and it's relation to climate and vegetation. *Ecological Application*, 2002, 10(2): 423-436.
- [22] Ruan H H, Jiang Z L, Gao S M. Preliminary studies of carbon cycling in three types of forests in the hilly regions of southern Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16(6): 17-21.
- [23] Fang X, Tian D L, Xiang W H. Density, storage and distribution of carbon Chinese Fir Plantation at fast growing stage. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(3): 14-19.
- [24] Ma Q Y, Chen X L, Wang J, Lin C, Kang F F, Cao W Q, Ma Z B, Li W Y. Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5/6): 96-100.
- [25] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168: 241-256.
- [26] Zinn Y L, Resck D V S, da Silva J E. Soil organic carbon as affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. *Forest Ecology and Management*, 2002, 166: 285-294.
- [27] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345-360.
- [28] Turner J, Lambert M. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australis. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133: 231-247.
- [29] Bai X S, Hu Y L, Zeng D H, Jiang Z R. Effects of farm land afforestation on ecosystem carbon stock and its distribution pattern in sem i-arid region of Northwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10): 1647-1652.
- [30] Peng W Y, Zhang K L, Chen Y, Yang Q K. Research on soil quality change after returning farmland to forest on the loess sloping croplands. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 272-278.
- [31] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. Impact of land-use change on soil carbon storage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 593-599.
- [32] Tian D L. *Structure and Function of Masson Pine and Slash Pine ecosystem*. Beijing: Science Press, 2005.

参考文献:

- [1] 赵敏,周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. *地理科学*, 2004, 24(1): 50-54.
- [4] 陈广生,田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 189-204.
- [7] 李世东,翟洪波. 世界林业生态工程对比研究. *生态学报*, 2002, 22(11): 1977-1982.
- [8] 张学权,胡庭兴,李伟,宫渊波. 华西雨屏退耕地不同植被经营模式坡面径流和产沙特征分析. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 27-33.
- [9] 李文忠,贺永元,张伟华,周心澄. 北川河流域退耕还林(草)对土壤质量影响的评价. *水土保持研究*, 2005, 12(6): 1-3.
- [10] 龙键,邓启琼,江新荣,刘方. 西南喀斯特地区退耕还林(草)模式对土壤肥力质量演变的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1279-1284.

- [11] 王春梅,刘艳,红邵彬,赵景刚. 量化退耕还林后土壤碳变化. 北京林业大学学报,2007,29(3):112-119.
- [12] 陈亮中,肖文发,唐万鹏,潘磊,史玉虎. 三峡库区几种退耕还林模式下土壤有机碳研究. 林业科学,2007,43(4):111-114.
- [13] 吴小山,黄从德. 退耕还林地桦木林生态系统碳素密度、贮量与空间分布. 生态学杂志,2007,26(3):323-326.
- [14] 黄从德,张健,邓玉林,杨万勤. 退耕还林地在植被恢复初期碳储量及分配格局研究. 水土保持学报,2007,21(4):130-133.
- [15] 田大伦. 杉木林生态系统定位研究方法. 北京:科学出版社,2004.
- [16] 蒋有绪. 川西亚高山冷杉林枯枝落叶层的群落学作用. 植物生态学与地植物丛刊,1981,6(2):89-98.
- [17] 张万儒,许本彤. 山地森林土壤枯枝落叶层结构和功能研究. 土壤学报,1990,27(2):121-131.
- [18] 陈堆全. 木荷凋落物分解及对土壤作用规律的研究. 福建林业科技,2001,28(2):86-88.
- [20] 张华,张甘霖,漆智平,赵玉国. 热带地区农场尺度土壤质量现状的系统评价. 土壤学报,2003,40(2):186-193.
- [22] 阮宏华,姜志林,高苏铭. 苏南丘陵主要森林类型碳循环研究—含量与分布规律. 生态学杂志,1997,16(6):17-21.
- [23] 方晰,田大伦,项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布. 林业科学,2002,38(3):14-19.
- [24] 马钦彦,陈遐林,王娟,蔺琛,康峰峰,曹文强,马志波,李文宇. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析. 北京林业大学学报,2002,24(5/6):96-100.
- [29] 白雪爽,胡亚林,曾德慧,蒋志荣. 半干旱沙区退耕还林对碳储量和分配格局的影响. 生态学杂志,2008,27(10):1647-1652.
- [30] 彭文英,张科利,陈瑶,杨勤科. 黄土坡耕地退耕还林后土壤理化性质变化研究. 自然资源学报,2005,20(2):272-278.
- [31] 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. 应用生态学报,2004,15(4):593-599.
- [32] 田大伦著. 马尾松和湿地松林生态系统结构与功能. 北京:科学出版社,2005.

2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2009 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2;影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 22 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 22 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元