

# 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段 碳储量与格局特征<sup>\*</sup>

官超<sup>1,2,4</sup> 汪思龙<sup>1,2\*\*</sup> 曾掌权<sup>1,2,4</sup> 邓仕坚<sup>1,2</sup> 陈建平<sup>3</sup> 龙康寿<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>2</sup>中国科学院会同森林生态实验站, 湖南会同 418307; <sup>3</sup>湖南省会同县鹰嘴界国家级自然保护区, 湖南会同 418307; <sup>4</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 研究了湖南鹰嘴界自然保护区内马尾松(*Pinus massoniana*)林、马尾松阔叶树混交林和常绿阔叶林这3种处于不同演替阶段森林类型的碳储量及时空分布格局。结果表明: 3种类型森林生态系统碳储量分别为182.86、179.84和229.12 Mg C · hm<sup>-2</sup>, 其中乔木层占59.57%~67.88%, 随森林进展演替增加, 乔木层是生态系统碳储量主要贡献者, 且各林分均以树干占乔木层碳储量比例最大; 土壤层占31.05%~36.55%, 碳储量随演替进展而增加, 但对森林生态系统碳储量贡献率减小; 林下植被和凋落物层分别占0.41%~3.04%和0.65%~2.53%, 均随演替进展而减少, 对生态系统碳储量贡献微弱; 演替过程中生物量碳与土壤碳储量比为1.96、1.69和2.20, 生物量碳在生态系统碳储量中所占比例呈增加趋势。可见在常绿阔叶林分布区, 实施近自然林经营, 模拟常绿阔叶林结构, 是提升该区域森林碳汇能力的重要途径。

**关键词** 碳储量; 碳含量; 森林演替; 中亚热带; 鹰嘴界自然保护区

**中图分类号** S718.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)9-1935-07

**Carbon storage and its distribution pattern of evergreen broad-leaved forests at different succession stages in mid-subtropical China.** GONG Chao<sup>1,2,4</sup>, WANG Si-long<sup>1,2\*\*</sup>, ZENG Zhang-quan<sup>1,2,4</sup>, DENG Shi-jian<sup>1,2</sup>, CHEN Jian-ping<sup>3</sup>, LONG Kang-shou<sup>3</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; <sup>2</sup>*Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huitong 418307, Hunan, China*; <sup>3</sup>*Yingzuijie National Nature Reserve, Huitong 418307, Hunan, China*; <sup>4</sup>*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30** (9): 1935–1941.

**Abstract:** This paper studied the carbon (C) storage and its distribution pattern of *Pinus massoniana* forest, mixed *P. massoniana*-broad-leaved forest, and evergreen broad-leaved forest representing three different succession stages of evergreen broad-leaved forests in Yingzuijie National Nature Reserve in Hunan Province. The C storage of the three forest ecosystems was 182.86, 179.84 and 229.12 Mg C · hm<sup>-2</sup>, respectively. With the largest share in trunk, the carbon stored in tree layers was the main contributor to the C storage, accounting for 59.57%–67.88%, and had an increasing trend with forest succession. The carbon sequestered in soil accounted for 31.05%–36.55%, which also increased with forest succession but had a decreasing proportion with the succession. The carbon storage of understory vegetation and litters had the least share, accounting for 0.41%–3.04% and 0.65%–2.53%, respectively, and decreased with forest succession. The ratio of biomass C to soil C storage of the three forest ecosystems was 1.96, 1.69, and 2.20, respectively, and biomass C played a more and more important role in forest C sequestration during the succession from *P. massoniana* forest to evergreen broad-leaved forest. It was suggested that to implement near-nature forest management or simulate evergreen

<sup>\*</sup> 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-305-05)资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: slwang@iae.ac.cn

收稿日期: 2011-02-23 接受日期: 2011-06-02

broad-leaved forest structure would be the main approach in promoting the carbon sequestering capacity of forest ecosystems in this region.

**Key words:** carbon storage; carbon concentration; forest succession; mid-subtropical China; Yingzuijie National Nature Reserve.

CO<sub>2</sub>浓度升高引起的全球气候变暖等一系列生态环境问题已成为当前生态学家、环境学家所关注的焦点。陆地生态系统在平衡、吸收大气中CO<sub>2</sub>等温室气体方面起着重要作用,是地球生物圈中三大碳库之一,其碳汇能力越来越受到人们的关注。森林作为陆地生态系统的重要组成部分,在调节全球碳循环、减缓大气CO<sub>2</sub>浓度升高方面具有不可替代的作用和地位。据统计,森林生态系统碳储量占陆地生态系统碳库总量的56%,其中森林植被碳储量占全球植被碳库总量的80%以上,土壤碳库也储存了占全球土壤碳库40%的碳(Dixon *et al.*, 1994; Brown *et al.*, 1999; Mathi *et al.*, 1999; Houghton *et al.*, 2001a, 2001b)。森林生态系统碳库的微小变化,都会对地-气碳交换过程、大气中CO<sub>2</sub>浓度产生一定的影响。据报道,1850—1998年,全球因土地利用变化而排放的CO<sub>2</sub>量高达(136±55) Gt C,其中87%来源于森林变化(Houghton *et al.*, 2000; IPCC, 2000)。目前,世界各国都在大力提倡植树造林,保护森林资源,以提高森林覆盖面积,发挥森林的巨大碳汇作用,吸收并固定大气中的CO<sub>2</sub>,进而减缓全球变暖(Watson, 2000; Zhang *et al.*, 2009)。森林生态系统碳储量是研究陆地与大气圈之间碳交换过程的基本参数,是进行碳循环、吸存过程调控必经环节之一,同时也是调控过程中所需解决的最基本难题之一(杨洪晓等, 2005)。目前在森林生态系统碳汇功能的研究方面,对森林生物量碳储量、土壤碳储量及其动态变化的分析由于采用的方法、研究空间尺度、研究方法、数据获取方式等方面的差异,导致研究结果差异悬殊,给分析特定区域森林生态系统源/汇关系带来不确定性。

森林碳储量与林分演替发育阶段有关,碳在器官中的分配比例是群落演替动态过程中重要特征之一。本文依托湖南会同鹰嘴界国家级自然保护区,通过代表性样地的调查取样,分析了中亚热带常绿阔叶林演替前期、中期和后期的马尾松次生林、马尾松阔叶树混交林和常绿阔叶林的碳储量及其格局特征,为合理估算中亚热带常绿阔叶林生态系统碳储量,分阶段实施亚热带森林碳管理措施提供参考依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 自然概况

调查样地设在湖南省会同县鹰嘴界国家级自然保护区,位于26°46' N—26°59' N, 109°49' E—109°58' E。海拔270~938 m,属于亚热带湿润气候,年平均气温13.1~16.6℃,年极端高温39.1℃,最低气温-8.6℃,无霜期为303 d。年降雨量1304~1603 mm,集中于4—9月,年蒸发量1140 mm,空气相对湿度83%左右。土壤主要为红壤和黄壤,平均容重1.25 g·cm<sup>-3</sup>, C/N值10.65~11.07,表层0~20 cm土壤有机质含量24.62~118.18 g·kg<sup>-1</sup>,平均73.19 g·kg<sup>-1</sup>(袁正科和林柏, 2003)。

在保护区核心区内选取具有代表性的马尾松林、马尾松阔叶树混交林及常绿阔叶林以表示该地区植被的不同演替阶段。其中马尾松(*Pinus massoniana*)林林龄为30~40 a,林下灌木稠密,以欏木(*Loropetalum chinensis*)、野漆(*Rhus sylvestris*)和油茶(*Camellia oleosa*)等为主;马尾松阔叶树混交林为栲树(*Castanopsis fargesii*)、豹皮樟(*Litsea rotundiflora*)和枫香(*Liquidambar formosana*)等阔叶树种逐渐入侵而成,属于马尾松纯林向常绿阔叶林演替的早期阶段,林龄20~30 a,调查时群落结构较简单,乔木I层为马尾松,II层主要为栲树,灌木层主要有杜茎山(*Elaeocarpus sylvestris*)、野漆(*Rhus sylvestris*)、野柿(*Diospyros kaki* var. *silvestris*)和菝葜(*Smilax china*)等;常绿阔叶林是该地区具有代表性的地带性植被类型,调查样地林龄30~40 a,乔木层以栲树、刨花楠(*Machilus pauhoi*)和杜英(*Elaeocarpus dulclouxii*)为优势树种,灌木层植物主要包括杜茎山、油茶、山胡椒(*Lindera glauca*)、大果卫矛(*Euonymus myrianthus*)和菝葜等。

### 1.2 样地设置

对自然保护区进行实地踏查的基础上,选择林相相对整齐、林分立地条件相似的区域,马尾松次生林、马尾松阔叶树混交林、常绿阔叶林3种林分类型各设置3个20 m×20 m的固定样地。各样地进行

每木检尺,乔木树种以胸径(DBH)5 cm 为起测径级。乔木调查主要包括种名、DBH、树高和冠幅;灌木、草本层测定其基径与株高,并记录种名。本实验于2010年4月下旬开始布设样地和群落调查,植被、土壤样品的采集于8月下旬进行。各样地立地条件及林分生长状况见表1。

1.3 生物量测定

乔木层生物量估算。常绿阔叶林为地带性顶级群落,生物量相对稳定,各样地阔叶树种的生物量测定采用现有生物量相对生长方程和样地调查数据相结合的方法,具体模型参数参见中国生态系统研究网络发布的生物监测数据库会同林区 FA02 表 (<http://www.cerndata.ac.cn>),马尾松各器官生物量回归模型来自文献(冯宗炜等,1982)。

1.4 林下植被与凋落物生物量的测定

在每个固定样地的4个角和中心位置,选择分布相对均一而且具有代表性的地段,各设置5个4 m×4 m 的小样方,做林下灌木和草本的常规调查。在样地外选择与小样方相似的地段,采用全部收获法收集灌木和草本,分地上、地下部分现场称鲜重;同时在每个1 m×1 m 范围内收集全部凋落物(不包括直径>2 cm 的粗木质残体)。对灌木、草本以及凋落物进行取样,带回实验室在75℃的恒温箱中烘干至恒重,由干/鲜重比计算含水率,从而推算出林下植被与凋落物的生物量现存量。

1.5 样品采集及碳含量测定

1.5.1 植物样品 乔木层优势树种分树干、树枝、树叶、树皮、树根分别取样,其他非优势树种分器官混合取样。在距离地面1.3 m 处取树干样品,并取主干皮样品;枝(带皮)从粗到细按比例进行混合取样,同时进行叶的不同大小、不同层的混合取样;根分大(>5 mm)、中(2~5 mm)、小(<2 mm)混合取样;灌木和草本分别取地上、地下部分的混合样品;地表凋落物层按分解和半分解混合采样。采用重铬酸钾-浓硫酸氧化外加热法测定全碳含量。

1.5.2 土壤样品 3种林分类型的每块样地中,分

上、中、下坡采用“S”形各挖5个土壤剖面,分4个层次(0~10 cm,10~20 cm,20~40 cm 和40~60 cm),每层采集土壤样品500 g 左右;在用环刀法测定各层土壤容重时,计算直径>2 mm 的砾石含量百分比。土壤样品于自然条件下风干,去除植物根系和砾石后过筛(孔径为0.25 mm),以重铬酸钾-浓硫酸氧化外加热法测定土壤有机碳含量。

1.6 森林生态系统各组分碳储量计算

乔木层各器官(干、枝、叶、皮、根)、林下植被(灌木、草本)和凋落物层碳储量以其生物量现存量乘以相应的碳含量求得,土壤层碳储量的计算采用如下公式:

$$SOC_n = \sum_{i=1}^n (1 - G_i) \times D_i \times C_i \times T_i / 10$$

式中, $SOC_n$ 为分 $n$ 层调查的土壤单位面积碳储量( $Mg\ C \cdot hm^{-2}$ ), $G_i$ 为第 $i$ 层直径 $\geq 2\ mm$ 的石砾含量(%), $D_i$ 为第 $i$ 层土壤容重( $g \cdot cm^{-3}$ ), $C_i$ 为第 $i$ 层土壤有机碳含量( $g \cdot kg^{-1}$ ), $T_i$ 为第 $i$ 土层的厚度(cm)。

1.7 数据处理

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)分析3种不同森林生态系统碳含量、储量的空间变异情况,并采用最小显著差法(LSD)进行多重比较。所应用的软件为Excel、SPSS 16.0。

2 结果与分析

2.1 生物量碳储量

2.1.1 群落不同层次碳含量特征 所调查的3种林分类型植被各组份碳含量随树种组成、器官和层次的不同而变化(表2)。马尾松林各器官碳含量均高于常绿阔叶林,以乔木层各器官之间差异最为明显( $P<0.01$ )。马尾松林各器官碳含量大小排序为干>皮>叶>枝>根,其中干碳含量极显著大于叶、枝和根( $P<0.01$ ),皮与枝、根也达到显著水平( $P<0.05$ ),群落内各组分碳含量差异显著;混交林各器官碳含量大小排序为干>叶>枝>皮>根,干碳含量显

表1 湖南鹰嘴界自然保护区各样地类型基本特征  
Table 1 Plot characteristics of forest types in Yingzuijie National Nature Reserve, Hunan, China

林分类型	坡度 (°)	坡向	平均胸径 (cm)	平均树高 (m)	林分密度 (株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	主要树种
PF	25~30	东南	20.15	18.55	1050	0.60	马尾松
PBF	26~30	西北	15.92	13.08	1350	0.75	马尾松、栲树、枫香
EBF	28~35	东南	18.10	14.80	1140	0.85	栲树、杜英、刨花楠、紫楠

PF, 马尾松林; PBF, 马尾松阔叶树混交林; EBF, 常绿阔叶林。下同。



表 2 湖南鹰嘴界自然保护区群落演替各组分碳含量、生物量及碳储量  
Table 2 Carbon concentration, biomass and carbon storage in each componenty of the community succession in Yingzuijie National Nature Reserve, Hunan, China

项目		碳含量 (g · kg <sup>-1</sup> )			生物量 (t · hm <sup>-2</sup> )			碳储量 (Mg C · hm <sup>-2</sup> )		
		PF	PBF	EBF	PF	PBF	EBF	PF	PBF	EBF
乔木层	干	507.24 (2.31)	476.17 (3.25)	443.90 (3.70)	107.40 (9.26)	123.98 (3.29)	178.63 (10.56)	54.45 (4.69)	59.04 (1.58)	79.29 (4.98)
	皮	496.15 (2.16)	434.65 (3.47)	418.29 (4.68)	11.25 (0.83)	20.97 (1.04)	19.56 (1.92)	5.58 (0.41)	9.11 (0.45)	8.18 (0.86)
	枝	479.22 (2.47)	452.59 (2.46)	444.43 (2.75)	29.82 (3.10)	36.41 (2.53)	63.67 (2.98)	14.28 (1.49)	16.48 (1.14)	28.30 (0.92)
	叶	489.88 (3.32)	460.73 (1.93)	457.44 (3.32)	23.87 (2.96)	11.93 (0.68)	22.32 (2.45)	11.70 (1.45)	5.50 (0.32)	10.21 (1.24)
	根	469.24 (1.41)	433.26 (2.31)	429.57 (3.39)	56.20 (7.60)	39.24 (1.78)	68.79 (3.91)	26.36 (3.56)	17.00 (0.77)	29.55 (2.23)
	小计	-	-	-	228.54 (23.67)	232.53 (9.32)	352.97 (21.82)	112.37 (11.61)	107.13 (4.25)	155.53 (10.23)
林下植被层	地上	429.66 (3.24)	422.72 (2.21)	415.77 (1.63)	7.83 (0.77)	5.28 (0.75)	1.51 (0.59)	3.36 (0.33)	2.23 (0.32)	0.63 (0.25)
	地下	407.49 (2.43)	405.04 (2.18)	402.59 (3.47)	5.37 (0.21)	4.01 (0.19)	0.76 (0.18)	2.19 (0.09)	1.62 (0.08)	0.31 (0.07)
	小计	-	-	-	13.20 (0.98)	9.29 (0.94)	2.27 (0.77)	5.55 (0.42)	3.85 (0.40)	0.94 (0.32)
凋落物层	凋落物	483.53 (1.71)	454.55 (2.12)	425.56 (2.33)	9.58 (0.91)	6.89 (0.51)	3.53 (0.87)	4.63 (0.44)	3.13 (0.23)	1.50 (0.35)

括号内数字为标准误。

著大于枝、皮和根 ( $P<0.01$ ), 混交林受马尾松的影响, 有较高的含碳量; 常绿阔叶林各器官碳含量大小为叶>枝>干>根>皮, 叶碳含量要显著大于皮和根 ( $P<0.05$ ), 各器官、层次碳含量差异没有马尾松林明显。

随演替进行, 林下植被碳含量呈递减趋势 (表 2)。地上部分碳含量为 415.77 ~ 429.66 g · kg<sup>-1</sup>, 差异显著 ( $P<0.05$ ); 地下部分 402.59 ~ 407.49 g · kg<sup>-1</sup>, 差异不显著 ( $P>0.05$ ), 但地上与地下间碳含量差异均显著 ( $P<0.01$ )。常绿阔叶林演替过程中 3 个阶段群落碳含量在垂直空间上有相同的分布特征, 都以乔木层最大。

**2.1.2 乔木层碳储量** 马尾松林经马尾松阔叶树混交林演变到常绿阔叶林, 乔木层生物量由 228.54 t · hm<sup>-2</sup> 增加到 352.97 t · hm<sup>-2</sup> (表 2), 马尾松林生物量与马尾松阔叶树混交林差异不明显, 是常绿阔叶林的 64.75%。随演替进展, 乔木层各器官以树干生物量的增加最为显著, 且 3 种林分中均是树干占乔木层生物量的比例最大 (46.99% ~ 53.32%), 树根 (16.88 ~ 24.59%) 次之。演替过程中, 均以乔木层对群落生物量贡献最大 (90.94% ~ 98.38%), 且随演替进展呈增加趋势。

3 种林分类型中, 常绿阔叶林各器官碳含量虽然低于马尾松林, 但由于其乔木层生物量较大, 导致其生物量碳储量也是最大的 (155.53 Mg · hm<sup>-2</sup>),

分别是马尾松林及马尾松阔叶树混交林乔木层碳储量的 1.38 倍和 1.45 倍。随演替进展, 乔木层占植被碳储量的 95.29%、96.53% 和 99.40%, 可见乔木层在森林群落中的主体固碳作用越来越明显。各林分中树干占乔木层固碳比例均为最大 (48.46% ~ 55.11%), 其次是根 (15.87% ~ 23.46%)。

**2.1.3 林下植被碳储量** 随演替进展, 林下植被碳储量呈递减趋势 (表 2)。所调查的 3 种林分林下植被生物量为 2.27 ~ 13.20 t · hm<sup>-2</sup>, 占群落生物量的 0.63% ~ 5.25%, 相应的碳储量也仅占 0.60% ~ 4.53%, 且都随演替进行而减少。林下植被随演替进展而减少, 主要是由于常绿阔叶林冠层郁闭度较高, 消光系数大, 林下光照较弱, 灌木、草本稀疏; 而马尾松林冠层郁闭度低, 林下光照充足, 灌木生长旺盛。

**2.2 凋落物碳含量及储量**

凋落物现存量在不同演替阶段具有显著差异 ( $P<0.05$ )。马尾松林演替到常绿阔叶林, 凋落物碳含量为 425.56 ~ 483.53 g · kg<sup>-1</sup> (表 2), 其中马尾松林显著大于常绿阔叶林 ( $P<0.01$ ), 这主要受乔木树种的影响。3 种林分类型地表凋落物现存量平均为 6.67 t · hm<sup>-2</sup>, 马尾松林极显著的大于常绿阔叶林 ( $P<0.01$ ), 前者是后者的 2.7 倍, 正因为如此, 常绿阔叶林凋落物层碳储量最小。随森林正向演替的进行, 地表凋落物现存量和碳储量对整个生态系统碳

表3 鹰嘴界自然保护区森林类型各层土壤碳含量及储量  
Table 3 SOC concentration and storage of forest types in Yingzuijie National Nature Reserve

土壤层次 (cm)	土壤碳含量( g · kg <sup>-1</sup> )			土壤碳储量( Mg C · hm <sup>-2</sup> )		
	PF	PBF	EBF	PF	PBF	EBF
0 ~ 10	17. 99(3. 29)	28. 22(2. 34)	39. 20(3. 22)	19. 75(0. 41)	21. 53(0. 88)	23. 32(0. 96)
10 ~ 20	12. 67(4. 13)	19. 80(2. 47)	21. 74(2. 37)	12. 06(0. 22)	14. 61(0. 70)	15. 52(0. 64)
20 ~ 40	8. 56(2. 24)	9. 47(0. 32)	11. 60(1. 93)	16. 85(0. 69)	17. 15(0. 76)	19. 16(0. 79)
40 ~ 60	7. 36(0. 52)	7. 35(0. 60)	7. 76(1. 36)	11. 65(0. 56)	12. 44(0. 59)	13. 14(0. 63)
合计	—	—	—	60. 31(1. 88)	65. 73(2. 86)	71. 15(3. 02)

括号内数字为标准误。

储量的贡献逐渐变小,与林下植被碳储量贡献率呈相同的变化趋势。

2.3 土壤碳含量及储量

2.3.1 土壤碳含量 马尾松林、马尾松阔叶树混交林和常绿阔叶林土壤碳含量平均为 11.65、16.21 和 20.08 g · kg<sup>-1</sup>,表现出随演替进行而增加的特点(表 3)。3 种林分 0 ~ 60 cm 土层碳含量均随深度的增加而减少,各层土壤碳含量垂直空间分布在 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 3 个土层间差异达到显著水平( $P<0.05$ ),随土层厚度的增加,差异减弱,20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 两土层碳含量差异已不显著;不同林分同层土壤碳含量随演替进行呈增加趋势,其中表层 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 土层由马尾松林演替到常绿阔叶林碳含量增加显著( $P<0.05$ ),其余两土层增加不显著。演替过程中土壤碳含量变化主要体现在表土层 40 cm 范围内。

2.3.2 土壤碳储量 土壤碳储量与碳含量变化规律相同,随演替进展增加,表现为马尾松林<马尾松阔叶树混交林<常绿阔叶林(表 3)。3 种林分类型土壤碳储量在垂直空间上均表现为表层 0 ~ 10 cm 显著大于其他层次( $P<0.05$ ),20 ~ 40 cm 土层碳储量与其他层存在显著差异,是由于分层厚度差异的影响,土壤碳储量总体上呈随土层厚度增加而减少的趋势;随森林正向演替,各土层碳储量均增加,但增加趋势随深度的增加而变小。0 ~ 10 cm 和 20 ~ 40 cm 2 个层次对土壤碳储量贡献率最大,分别达到 32.75% ~ 32.78% 和 26.09% ~ 27.95%。本研究中,0 ~ 40 cm 土层碳储量占总体的 80.68% ~ 81.52%,是森林土壤层碳储量的主体。

2.4 生态系统碳储量及其分配

马尾松林、马尾松阔叶树混交林和常绿阔叶林生态系统碳储量分别为 182.86、179.84 和 229.12 Mg C · hm<sup>-2</sup>,随群落进展演替呈增加趋势(图 1),常绿阔叶林碳储量显著大于马尾松林和马尾松阔叶树混交林( $P<0.01$ ),不同组分在不同演替阶段对生态

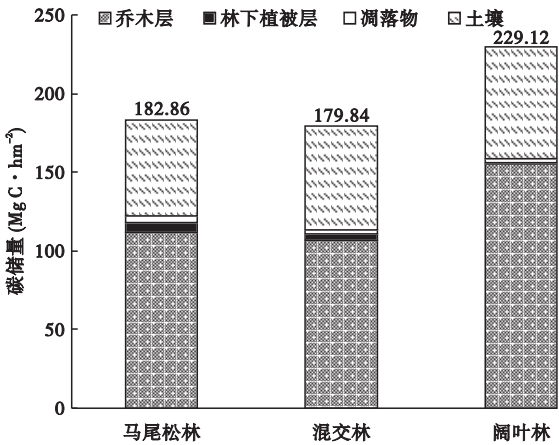


图1 鹰嘴界自然保护区各森林生态系统碳储量分配  
Fig.1 Carbon storage allocation of forest ecosystems in Yingzuijie National Nature Reserve

系统碳储量的贡献有所差异。乔木层碳储量随演替进展呈增加的趋势,对生态系统碳储量贡献率分别为 61.45%、59.57% 和 67.88%,固碳作用越来越重要;土壤层碳储量的增加趋势及增大幅度没有乔木层明显,其所占比重随演替进行而降低,分别为 32.98%、36.55% 和 31.05%,固碳贡献率仅次于乔木层。可见,在森林生态系统演替过程中,乔木层和土壤层是碳储量的主体部分,但乔木层碳储量差异是导致不同演替阶段森林生态系统碳储量差异的主要原因。本研究中林下植被及凋落物在固碳方面作用微弱,仅占 0.41% ~ 3.04% 和 0.65% ~ 2.53%,并且随着演替的进展呈降低的趋势,3 种林分类型碳储量具有相同的空间分布格局特征。

3 讨论

3.1 生物量碳储量

与以往研究结果相比,湖南鹰嘴界自然保护区马尾松林、马尾松阔叶树混交林和常绿阔叶林乔木层碳储量高于中国温性和暖性(方精云等, 1996;王效科和冯宗炜, 2000)、热带亚热带针叶林、针阔混

交林、阔叶林植被碳储量的平均值 (Kolchugina & Vinson, 1993; 王绍强等, 1999; 王效科和冯宗炜, 2000), 更高于中国森林植被平均碳储量 (周玉荣等, 2000)。本研究中, 马尾松林乔木层碳储量大于马尾松阔叶树混交林, 主要是受马尾松各器官较高碳含量的影响, 且与鼎湖山马尾松林 (林龄 60 ~ 70 a) 植被碳储量相当, 说明湖南鹰嘴界地区气候和土壤条件有利于马尾松生物量碳的积累; 另外, 马尾松阔叶树混交林碳储量也明显小于鼎湖山马尾松针阔混交林 (方运霆等, 2003), 说明了该林分仍处于该阶段的早期, 具有很大的固碳潜力空间; 根据邓仕坚等 (2000) 的报道, 处于同一立地类型区的湖南会同红栲群落碳储量大于本调查的常绿阔叶林, 这可能是具体调查地段的林分结构和差异引起的。

### 3.2 土壤碳储量

本研究中调查的 3 种林分土壤类型属于山地黄壤, 取样深度为 0 ~ 60 cm, 其碳储量变化为 60.31 ~ 71.15 Mg C · hm<sup>-2</sup>, 低于中国东部地区森林土壤碳储量平均值 (王绍强和周成虎, 1999; 王绍强等, 2000), 也远小于周玉荣等 (2000) 报道的中国主要森林生态系统类型相应的 0 ~ 100 cm 层土壤碳储量, 其原因除了与取样深度有关外, 还与土壤碳取样分析方法有关。本研究也考虑了直径 > 2 mm 砾石的影响, 计算土壤碳储量时扣除了其所占的土壤空间, 砾石含量也是导致森林土壤碳不确定性的重要因素之一。除此之外, 土壤碳储量受地上植被、凋落物输入和有机质分解的影响, 这二者与水热条件密切相关, 气候条件会对土壤碳库容量造成强烈影响 (周玉荣等, 2000)。中亚热带地区常年降雨丰富、温度较高, 生物地球化学循环旺盛, 有机物质分解速度快, 不利于土壤碳的积累, 尤其是表层土壤。受该地区土壤类型影响, 本研究中 0 ~ 40 cm 土层碳储量占 0 ~ 60 cm 的 80.68% ~ 81.52%, 碳储量随土层厚度增加而减小, 森林土壤碳储量以表土层为主。这与黄宇等 (2005) 对本地区杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统碳储量分布特征相似, 也说明了本区域土壤碳储量主要集中于表层, 人为干扰及植被覆盖变化容易对土壤碳库产生影响。

### 3.3 生态系统碳储量及空间分布

湖南鹰嘴界自然保护区马尾松林、马尾松阔叶树混交林和常绿阔叶林生态系统碳储量位于 179.84 ~ 229.12 Mg C · hm<sup>-2</sup>, 要小于中国森林生态系统的平均碳储量 (周玉荣等, 2000), 主要是受该

区域土壤碳储量低的影响; 常绿阔叶林碳储量与鼎湖山锥栗-黄果厚壳桂群落 (林龄 400 多年) 生态系统碳储量相当 (莫江明等, 2003), 说明研究区域、气候带、土壤质地的不同, 导致生态系统碳储量存在显著的差异。

研究的 3 种林分类型碳储量具有相同的空间分布特征, 均是乔木层最大, 其次是土壤层, 这与不同发育阶段的马尾松、杉木人工林 (尉海东和马祥庆, 2006; 尉海东和马祥庆, 2007) 乔木层和土壤碳储量相反, 与鼎湖山森林演替过程中植被、土壤碳分配特征相同 (方运霆等, 2003), 说明林型、树种组成、立地条件的不同, 不仅引起森林生态系统固碳量的巨大差异, 还会影响系统中不同组分的碳分配格局。本研究中, 马尾松林经混交林演替到常绿阔叶林, 乔木层与土壤层碳储量之比平均 1.89, 要高于全球低纬度地区森林植被与土壤的平均比值 (Dixon *et al.*, 1994), 也大大的高于中国针叶、针阔混交林和常绿阔叶林的平均水平, (周玉荣等, 2000), 这主要是因为该区域土壤碳储量相对较小, 而乔木层碳储量较大, 充分表明了乔木树种在中亚热带地区森林固碳中的重要地位。

王效科和冯宗炜 (2000) 对中国森林生态系统植物碳储量的研究表明, 马尾松林、针阔混交林和阔叶混交林实际碳储量仅占潜在碳储量的 17.06%、42.41% 和 46.45%; 中国森林植被碳储量受到人类活动的强烈干扰, 可以说人为因素的干扰已经掩盖了气候条件对植被碳储量的影响 (王效科等, 2001)。本研究中, 马尾松林、马尾松阔叶树混交林发展到常绿阔叶林, 生态系统碳储量分别增加 46.26 和 49.28 Mg C · hm<sup>-2</sup>。中国南方大面积的针阔混交林, 是向阔叶林演替的重要阶段, 所以采取适当的森林经营管理措施, 减少对植被的干扰与破坏, 以发挥植被的巨大碳库作用。为了提高森林碳汇能力, 还应加大现有天然林保护力度, 禁止过渡采伐、乱砍滥伐, 并采取积极预防措施, 增加森林植被对自然灾害的抵抗性, 以避免碳汇功能的下降。此外, 可利用该地区的气候、土壤特点, 采用近自然林的模式发展高固碳人工林 (如马尾松) 也是提高该地区碳汇能力的重要途径。

### 参考文献

邓仕坚, 廖利平, 汪思龙, 等. 2000. 湖南会同红栲-青冈-刨花楠群落生物生产力的研究. 应用生态学报, 11(5):



- 651-654.
- 冯宗炜, 陈楚莹, 张家武, 等. 1982. 湖南省会同县两个森林群落的生物生产力. 植物生态学与地植物学丛刊, **6**(4): 257-267.
- 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 1996. 中国土壤碳库及其全球重要性. 环境科学学报, **8**: 249-254.
- 方运霆, 莫江明, 彭少麟, 等. 2003. 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用. 生态学报, **23**(9): 1685-1694.
- 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 等. 2005. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. 生态学报, **25**(12): 3146-3154.
- 莫江明, 方运霆, 彭少麟, 等. 2003. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林碳素积累和分配特征. 生态学报, **23**(10): 1970-1976.
- 尉海东, 马祥庆. 2006. 中亚热带不同发育阶段杉木人工林生态系统碳贮量研究. 江西农业大学学报, **28**(2): 239-244.
- 尉海东, 马祥庆. 2007. 不同发育阶段马尾松人工林生态系统碳贮量研究. 西北农林科技大学学报, **35**(1): 171-174.
- 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 2000. 中国土壤有机碳库及其空间分布特征. 地理学报, **55**(5): 533-544.
- 王绍强, 周成虎, 罗承文. 1999. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨. 地理科学进展, **18**(3): 238-244.
- 王绍强, 周成虎. 1999. 中国陆地生态系统土壤碳库估算. 地理学研究, **18**(4): 349-356.
- 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 2001. 中国森林生态系统的植物碳贮量和碳密度研究. 应用生态学报, **12**(1): 13-16.
- 王效科, 冯宗炜. 2000. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力. 生态学杂志, **19**(4): 72-74.
- 杨洪晓, 吴波, 张金屯, 等. 2005. 森林生态系统的固碳功能和碳储量研究进展. 北京师范大学学报, **41**(2): 172-177.
- 袁正科, 林柏. 2003. 湖南鹰嘴界自然保护区综合科学考察报告. 湖南省林业科学院.
- 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 2000. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, **24**(5): 518-522.
- Brown SL, Schroeder P, Kern JS. 1999. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management*, **123**: 81-90.
- Dixon RK, Brown S, Houghton RA, et al. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, **263**: 185-190.
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ. 2001a. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. U. K.: Cambridge University Press.
- Houghton RA, Lawrence KT, Hackler JL, et al. 2001b. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: A comparison of estimate. *Global Change Biology*, **7**: 731-746.
- Houghton RA, Skole DL, Nobre CA, et al. 2000. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, **403**: 301-304.
- IPCC. 2000. Land use, land-use change, and forestry, a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. U. K.: Cambridge University Press.
- Kolchugina TP, Vinson TS. 1993. Carbon sources and sinks in forest biomes of the former Soviet Union. *Global Biogeochemical Cycles*, **7**: 291-304.
- Mathi Y, Baldocchi DD, Jarvis PG. 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment*, **22**: 715-740.
- Watson RT. 2000. Land use, land-use change, and forestry: A special report of the IPCC. U. K.: Cambridge University Press.
- Zhang XP, Wang MB, Liang XM. 2009. Quantitative classification and carbon density of the forest vegetation in Luliang Mountains of China. *Plant Ecology*, **201**: 1-9.

---

作者简介 宫超,男,1984年8月生,硕士研究生。主要从事森林生态系统碳汇功能研究。E-mail: gongchao105@163.com

责任编辑 王伟

---