

四川西北部亚高山云杉天然林生态系统碳密度、净生产量和碳贮量的初步研究

马明东¹ 江洪^{2,3*} 罗承德¹ 刘跃建¹

(1 四川农业大学 四川都江堰 611830) (2 南京大学国际地球系统科学研究所 南京 210093)

(3 西南大学教育部三峡库区生态环境重点实验室 重庆 400715)

摘要 该文利用野外实际调查数据对四川西北部亚高山云杉 (*Picea asperata*) 天然林碳密度、净生产量、碳贮量及其分布进行了分析。结果表明,在调查区域,云杉天然林分平均生物量为 $230.37 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中乔木层为 $212.77 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占林分生物量的 92.30%。云杉天然林生态系统各组分的平均碳密度为树干 57.85%、树皮 47.12%、树枝 51.22%、树叶 48.27% 和树根 52.39%。灌木层平均碳密度 49.91%、草本层平均碳密度 46.34%、地被层平均碳密度 43.21%、枯落物层平均碳密度 39.44%。土壤碳密度平均值为 1.41%。随土层深度增加各层次土壤碳密度逐渐减少。云杉林平均生态系统总碳贮量为 $273.79 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中乔木层 $109.30 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占云杉林生态系统总碳贮量的 39.92%。灌木层 $5.69 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占 2.08%。草本层 $1.26 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占 0.46%。地被物层 $0.60 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占 0.22%。枯落物层 $0.83 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占 0.30%。林内土壤(0~100 cm)碳贮量为 $156.11 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占 57.01%。云杉林的碳库分布序列为土壤(0~100 cm) > 乔木层 > 灌木层 > 草本层 > 枯落物层 > 地被物层。云杉天然林分平均净生产总量为 $6838.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 碳素年总净固量平均为 $3584.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中乔木层净生产量为 $4676 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 占林分总量的 68.38%。碳素年平均固定量 $2552.99 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 占林分总量的 71.21%。

关键词 云杉 碳密度 净生产量 碳贮量

PRELIMINARY STUDY OF CARBON DENSITY, NET PRODUCTION AND CARBON STOCK IN NATURAL SPRUCE FORESTS OF NORTHWEST SUBALPINE SICHUAN, CHINA

MA Ming-Dong¹, JIANG Hong^{2,3*}, LUO Cheng-De¹, and LIU Yao-Jian¹

¹Sichuan Agriculture University, Dujiangyan, Sichuan 611830, China, ²The Institute of Earth System Science, Nanjing University, 210093, China, and ³Three Gorges Key Laboratory of Southwest University, Chongqing, 400715, China

Abstract *Aims* Carbon density, net production and carbon stock were estimated using data from natural spruce forests of Northwest Subalpine Sichuan.

Methods We harvested biomass, litter and soil carbon and calculated net production by dividing biomass by forest age.

Important findings The mean biomass of spruce forest is $230.37 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, with the tree layer accounting for $212.77 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (92.36%). The percentage of carbon density in tree organs are stem 57.85%, bark 47.12%, branch 51.22%, leaf 48.27%, and root 52.39%. The percentage of carbon density in different strata are shrub 49.91%, herb 46.34%, duff 43.21%, litter 39.44%, and soil 1.41%. Carbon density declines with increased soil depth. The carbon stock is $273.79 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, divided among the tree layer with $109.30 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (39.92%), shrub $5.69 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2.08%), herb $1.26 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (0.46%), duff $0.60 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (0.22%), litter $0.83 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (0.30%), and soil (0–100 cm) $156.11 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (57.01%). Therefore, the carbon stocks are ordered: soil (0–100 cm) > tree layer > shrub > herb > litter > duff. Mean net production is $6838.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, with the tree layer accounting for $4676 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (68.38%). Mean annual carbon sequestration is $3584.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, with the tree layer accounting for $2552.99 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (71.21%).

Key words spruce forests, carbon density, net primary production, carbon stock

收稿日期:2006-03-06 接受日期:2006-06-27

基金项目:四川省先导计划重点攻关项目“云杉天然林分可持续经营技术研究(03~06)”科技部国家基础理论研究规划项目:“中国西部森林变化及其对周边农业环境的影响(2002CB111504)”和国家林业局四川森林生态与资源环境实验室项目

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail:jianghong@nju.edu.cn

森林作为生物圈的主体,维持着全球植被碳库的 86% (Woodwell *et al.*, 1978; Houghton *et al.*, 1999) 和土壤碳库的 73% (Post *et al.*, 1982)。与其它类型的陆地生态系统相比较,森林生态系统具有较丰富的物种组成和较复杂的层次结构,在地圈-生物圈的生物化学过程中起着重要的“缓冲器”和“阀”的功能。森林生长过程中吸收大量的 CO₂,并具有长期的保存能力,因此,它对全球的碳平衡起着十分重要的作用 (Jiang *et al.*, 1999)。至 20 世纪 90 年代以来,许多科学家从全球、区域或国家尺度上研究了森林对全球碳平衡的影响 (Fang *et al.*, 1998, 2001; Jiang *et al.*, 1999),同时从森林群落研究碳循环特征和评价森林对大气 CO₂ 的平衡能力,也逐步地引起众多生态学家的高度关注 (Jiang *et al.*, 2002)。如雷丕锋 (2004)、方晰和田大伦 (2003) 和周国模和姜培坤 (2004) 等分别对樟树 (*Cinnamomum camphora*)、马尾松 (*Pinus massoniana*) 和毛竹 (*Phyllostachys pubescens*) 人工林生态系统碳密度和碳贮量及空间分布进行了深入研究。这些研究成果为我国森林碳汇功能研究做出了积极贡献。

云杉 (*Picea asperata*) 为我国特有树种。主要分布在我国四川岷江上游和大小金川流域、陕西西南部、甘肃东部和白龙江流域、洮河流域,是长江上游重要的水源涵养林地区。该树种喜光耐旱又耐寒,适应性强且材质优良,在我国西部亚高山地区的退化生态系统恢复中发挥着重要作用。虽然自 20 世纪 80 年代后期以来,我们陆续开展了关于云杉净初级生产力和立地质量评估的工作 (江洪, 1986; 马明

东和刘跃进, 2006), 但是关于云杉天然林群落有机物积累、变化、分布和碳密度方面的研究还是一个空白。本文对四川西北部亚高山云杉林分生物量、净生产量、碳密度和碳贮量及其空间分布进行了分析,初步阐明了云杉天然林碳积累和分配的规律,该论文的结果将为进一步研究中国西南亚高山暗针叶林生态系统碳循环及碳汇功能提供基础资料。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川西部高山林区的松潘、九寨沟和黑水等县,地理坐标: 103°18' ~ 104°14' E, 31°55' ~ 33°15' N, 调查地为高山峡谷和丘状高原地貌类型,海拔 2 400 ~ 3 500 m。土壤多为棕色森林土和褐色森林土,土层厚度 60 ~ 100 cm。

调查区由于属青藏高原东部边缘,海拔高且河谷深,气候十分复杂,不仅具有明显的垂直变化,即使在水平方向上,短距离内可能也有很大差异。年平均气温 5.8 ~ 9.1 °C,极端最高、最低温度分别为 33 °C 和 -21 °C,年平均相对湿度 65%,年平均降雨量 556.6 ~ 836.8 mm, ≥ 10 °C 累积温度 1 312.9 ~ 3 882.2 °C。按统一的技术要求,以林分面积 3% ~ 5% 比例典型抽样共调查样地 210 个,解析木 300 株,样地面积一般为 1 200 m²。样地调查包括生境因子、林分树木平均胸径,平均树高,平均年龄,林分蓄积量,优势木年龄和高度,样木解析及林分内地被物等 (江洪, 1986; 马明东和刘跃进, 2006)。调查区云杉天然林林分特征见表 1。

表 1 云杉样地林分特征因子统计表
Table 1 The characteristics of spruce stand sampling plots

林分变量 Stand variables	统计值 Statistical value			
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	标准差 Standard derivation
年龄 Age	27	150	59.35	38.96
平均直径 Average diameter breast height (cm)	9.0	23.2	18.92	4.17
平均树高 Average height (m)	6.1	20.6	14.53	3.62
每公顷株数 Timber stocking per hectare (株·hm ⁻²)	325	4 500	1 096	568
每公顷蓄积量 Timber stocking per hectare (m ³ ·hm ⁻²)	32.66	898.06	180.1	112.26
林分郁闭度 Stand closure (P)	0.4	0.9	0.68	0.10

1.2 云杉生物量和净生产量的测定

地上部分按收割法进行。具体作法是:在林分中的典型地带设置 40 m × 30 m 的样地。样地内进行每木检尺,据调查数据计算出林分的平均胸径

(\bar{D}) 和平均树高 (\bar{H})。按 \bar{D} 和 \bar{H} 找出标准木 2 ~ 3 株伐倒,按 2 m 长度切割成若干个区分段,然后按区分的各段,用“分层切割法”测定树干、树皮、树枝和叶的鲜重,同时对各器官的样品按“混合取样法”取样。

地下部分分别为优势木、平均木、被压木各一株,采用“分层挖掘法”,将根系按照自然状态挖出,分别按根桩、粗根(2 cm 以上)、中根(1~2 cm)、细根(1 cm 以下)分层,分级称取鲜重,并取样。上述各器官各层次样品带回实验室在 80 °C 烘箱中烘干至恒重,计算出各器官干物质重量。然后根据建立的回归方程式推算各器官干重生物量和林分每公顷生物量。

净生产量为单位面积,单位时间内除去呼吸消耗外生产的有机质数量。本文用下式来计算。

$$Q_W = \frac{W}{A} \quad (1)$$

式中, Q_W 为净初级生产量, W 为生物量, A 为年龄。

1.3 林下植被生物量、凋落物量的测定

在典型样地内设置 2 m×2 m 小样方 5 块,梅花形分布,采用“样方收获法”测定。分种测定茎、叶、根鲜重,选取样品,在 80 °C 烘箱中烘干至恒重,计算其生物量。

1.4 样品化学分析方法

按层分组分别采集分析样品,样品组分为干、

皮、枝、叶和根。对采集样品逐一进行化学分析。土壤分层(0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm)采集样品,测定土壤容重,计算单位面积土层重量。植物、土壤样品中碳素含量采用重铬酸钾-水合加热法测定。

2 结果与讨论

2.1 云杉天然林分生物量

2.1.1 乔木层生物量的积累

根据建立的云杉单株各器官生物量经验公式计算,云杉天然林分乔木层生物量为 $212.77 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。乔木层各器官生物量及其分配比例见表 2。

2.1.2 灌木、草本、地被物和枯落物生物量的积累

云杉天然林生态系统各组分生物量及其分配比例见表 3。

2.2 云杉天然林生态系统中各组分碳密度

2.2.1 云杉林分乔木层各器官碳密度

由表 4 可见云杉林分乔木层各器官碳密度排序为树干>树根>树枝>树叶>树皮,其变化范围在 47.12%~57.85%,平均值为 51.37%。

表 2 云杉(*Picea asperata*)林分乔木层各器官生物量及其分配比例

Table 2 The biomass and allocation percentage of organs in spruce stand tree layer ($\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

器官 Organ	树干 Trunk	树皮 Bark	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Root	合计 Total
生物量 Biomass	147.91	6.75	26.34	5.28	26.49	212.77
%	69.52	3.18	12.38	2.49	12.45	100.00

表 3 云杉(*Picea asperata*)林分各组分生物量及其分配比例

Table 3 The biomass and allocation percentage of spruce stand ($\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

组分 Component	乔木 Tree	灌木 Shrub	草本 Herb	地被物 Duff layer	枯落物 Litter	林分 Forestry
生物量 Biomass	212.77	11.40	2.71	1.38	2.11	230.37
%	92.36	4.95	1.18	0.60	0.91	100.00

表 4 云杉(*Picea asperata*)不同器官碳密度

Table 4 The carbon density in different organs of spruce tree (%)

器官 Organ	树干 Trunk	树枝 Branch	树叶 Leaf	树皮 Bark	树根 Root	平均值 Average
碳密度 Carbon density	57.85	51.22	48.27	47.12	52.39	51.37
变异系数 Variation coefficient (%)	7.64	8.75	10.12	6.31	7.24	

2.2.2 云杉天然林下植被及土壤中的碳密度

林下植被及枯落物碳密度测定结果见表 5。灌木层碳密度平均值为 49.91%,草本层为 46.34%,地被物层为 43.21%,枯落物碳密度平均值为

39.44%。表现出随植物个体高度及组织木质化程度的降低,其碳密度降低的趋势。

云杉天然林下枯落物及土壤中碳密度见表 6,由于枯落物中的部分有机物被分解,而使枯落物层

碳密度相对比地上各层次植被的碳密度低,由于枯落物分解使部分碳以有机质的形式进入土壤,而大部分的碳则以 CO_2 形式释放到大气中,经测定,云杉天然林内枯落物碳密度平均值为 39.44%,土壤中表现出土壤深度的增加,碳密度递减。

表 5 云杉 (*Picea asperata*) 林分林下植被碳密度
Table 5 The carbon density of understore in spruce stand (%)

项目 Items	灌木 Shrub	草本 Herb	地被物 Duff
平均值 Average	49.91	46.34	43.21

表 6 云杉 (*Picea asperata*) 林下枯落物、土壤中碳密度
Table 6 The carbon density of litter and soil in spruce stands

层次 Layers	组分 Component	碳密度 Carbon density (%)
枯落物 Litter	未分解枯落物 Under composed litter	48.34
	半分解枯落物 Semi decomposed litter	45.26
	已分解枯落物 Decomposed litter	24.69
	平均 Average	39.44
土壤层 Soil layer	0~20 cm	2.69
	20~40 cm	1.47
	40~60 cm	1.12
	60~80 cm	0.94
	80~100 cm	0.83
	平均 Average	1.41

2.3 云杉天然林生态系统中各组分碳贮量及其空间分布

2.3.1 云杉乔木层各器官碳贮量

云杉各器官的生物量与相应碳密度的积为各器官碳贮量。由此,计算云杉乔木层各器官碳贮量(表 7)。

从表 7 看出,树干碳贮量最高为 $85.57 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占乔木层碳贮量的 72.11%,其次是树根和树枝,碳贮量分别为 13.88×10^3 和 $13.49 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占乔木层碳贮量的 11.70% 和 11.37%,树叶和树皮碳贮量在乔木层各器官中最低,分别只有 $2.55 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $3.18 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,只占乔木层碳贮量的 2.15% 和 2.68%。

2.3.2 云杉天然林生态系统碳素库的空间分布

碳素库的空间分布是指森林生态系统碳贮量在乔木层、灌木层、草本层、地被物层、枯落物层和土壤等不同层次的分配情况,根据各组分的生物量或土壤质量及相应的碳密度转换系数,计算云杉天然林生态系统中各组分碳贮量及其空间分布状况(表 8)。

2.3.3 云杉天然林生态系统不同群落类型碳素库

由于云杉分布区气候差异明显,地形变化复杂,生态环境多样,使林地植被具有一系列的生态地理特点,不同的群落结构形成不同的林地指示种,表现出不同群落,反映出不同碳贮量差异。分别在云杉分布区常见的偏干灌木-云杉林,中生箭竹-云杉林,干性草类-云杉林和湿润苔藓-云杉林 4 种典型群落类型,测定其碳贮量(表 9)。

2.4 云杉天然林净生产量与碳素年净固定量

2.4.1 云杉天然林分平均净生产量

确定系统同化 CO_2 的能力是森林生态系统生产力研究的重要内容之一。云杉林分净生产量(ΔP_m)为 $t_1 \sim t_2$ 期间植物的生产量(Y_n)、植物的凋落物及枯损物量(ΔL_n)、被动物吃掉的损失量(ΔG_n) 3 个分量之和,即 $\Delta P_m = Y_n + \Delta L_n + \Delta G_n$ 。但是,测定 ΔG_n 非常困难,通常多以平均净生产量 Q_w 衡量林分生产力的高低。

云杉林分乔木层中树干、树皮、树枝和树根的平均净生产量是按各器官生物量被乔木的年龄所除之商,叶的平均净生产量是按叶在树枝上着生的时间(4 年)所除而得,灌木按其优势种和次优势种的数量综合考虑取 10 年,草本、地被物取 4 年计算其平均净生产量(表 10 表 11)。

从表 10 和表 11 可以看到,云杉天然林分的净初级生产力为 $6\ 838.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,乔木层的净初级生产力为 $4\ 676 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.4.2 云杉天然林碳素年净固定量

根据云杉林分各组分净生产力及相应组分碳密度的积计算出各组分碳年净固量(表 12)。

从表 12 可以看出云杉天然林有机碳年净固量为 $3\ 584.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中乔木层碳素年净固量 $2\ 552.99 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,占林分总量的 71.21%,灌木层碳素年净固量 $568.97 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,占林分总量的 15.87%,草本层碳素年净固量 $313.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,占 8.76%,地被物层碳素年净固量 $149.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,占林分总量的 4.16%。计算云杉分布区常见的偏干灌木-云杉林、中生箭竹-云杉林、干性草类-云杉林和湿润苔藓-云杉林 4 种典型群落平均净生产量和碳素年净固定量,结果见表 13。

由表 13 看出:偏干灌木-云杉林分平均净生产量和碳素年净固定量最高,分别为 $7\ 515.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $3\ 779.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其次是中生箭竹-云杉林,分别为 $7\ 125.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $3\ 591.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,再是干性草类-云杉林,分别为 $6\ 517.0$

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $3\,272.37\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，湿润苔藓-云杉林平均净生产量和碳素年净固量最低，分别只有 $3\,672.75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $1\,829.46\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。这是因为偏干灌木、中生箭竹云杉林多分布在高山峡谷，海拔 $3\,000\text{ m}$ 左右下部窄谷半阴、半阳坡，林下土壤多为山地棕壤和山地腐殖质棕壤，林地冷暖、干湿

较为适宜，故表现出较高净生产量和碳素年净固定量。而阴湿藓类云杉林，多分布在海拔 $3\,300\sim 3\,600\text{ m}$ 的丘状高原的阴坡，虽具有深厚的土层和腐殖质层，但由于土壤含水量较大，通气不良、冻土层较深，解冻迟，林木生长期短，故表现出较低的净生产量和碳素年净固量。

表 7 云杉 (*Picea asperata*) 乔木层各器官碳贮量及其分配
Table 7 The carbon stock of each organs in spruce tree layer ($\times 10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

器官 Organ	树干 Trunk	树皮 Bark	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Root	合计 Total
碳贮量 Carbon stock	85.57	3.18	13.49	2.55	13.88	118.67
%	72.11	2.68	11.37	2.15	11.70	100.00

表 8 云杉 (*Picea asperata*) 天然林生态系统碳贮量的分布
Table 8 The distribution of carbon stock in spruce stand

组分 Component	生物量 Biomass ($\times 10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	碳密度 Carbon density (%)	碳贮量 Carbon stock ($\times 10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	碳贮量百分比 Percentage of carbon stock (%)
乔木层 Arborous layer	212.77	57.85 ~ 47.12 (51.37)	118.67	41.91
灌木层 Shrub layer	11.40	49.91	5.69	2.01
草本层 Herb layer	2.71	46.34	1.26	0.44
地被物层 Ground cover layer	1.38	43.21	0.60	0.21
枯落物层 Litter layer	2.11	48.38 ~ 24.69 (39.44)	0.83	0.29
土壤层 Soil layer				
0 ~ 20 cm	2 046	2.69	55.04	19.44
20 ~ 40 cm	2 137	1.47	31.41	11.10
40 ~ 60 cm	2 350	1.12	26.32	9.30
60 ~ 80 cm	2 413	0.94	22.68	8.00
80 ~ 100 cm	2 489	0.83	20.66	7.30
合计 Total			283.16	100.00

表 9 云杉 (*Picea asperata*) 天然林中 4 种典型群落碳贮量
Table 9 Carbon stock of four typical communities in natural spruce forest ($\times 10^3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

群落类型 Community type	碳贮量 Carbon stock					计 Total
	乔木 Arborous	灌木 Shrub	草本 Herb	地被物 Duff	枯落物 Litter	
偏干灌木-云杉 Dry shrub- <i>Picea asperata</i>	160.39	6.60	1.13	0.66	0.17	168.95
中生箭竹-云杉 Medium tagesia bamboo- <i>Picea asperata</i>	219.69	6.83	0.87	0.54	0.12	228.05
干性草类-云杉 Dry herb- <i>Picea asperata</i>	85.53	2.84	1.76	0.42	0.19	90.74
阴湿苔藓-云杉 Humid moss- <i>Picea asperata</i>	59.49	2.28	0.63	0.72	0.10	63.22

表 10 云杉 (*Picea asperata*) 林分乔木层平均净生产量
Table 10 Average net production of spruce tree layers ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

项目 Items	树干 Trunk	树皮 Bark	树枝 Branch	树叶 Leaf	根系 Root	合计 Total
平均净生产量 Average net production	2 507	233	616	344	976	4 676
占乔木层总量百分数 Percentage of tree layer (%)	53.62	4.99	13.18	7.36	20.88	100.00

表 11 云杉 (*Picea asperata*) 林分平均净生产量
Table 11 Average net production of spruce stand ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

项目 Items	乔木层 Tree	灌木层 Shrub	草本层 Herb	地被物层 Duff layer	合计 Total
平均净生产量 Average net production	4 676	1 140	677.5	345.0	6 838.5
占乔木层总量百分数 Percentage(%)	68.38	16.67	9.90	5.05	100.00

表 12 云杉 (*Picea asperata*) 林分各组分净生产量、碳素年净固定量
Table 12 Net production and carbon sequestration of each component in spruce stand

组分 Component	净生产量 Net production ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	占林分净生产量百分比 Percentage of stand(%)	碳素年净固定量 Net sequestration ($\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	占林分碳素年净 固定量百分比 Percentage of stand(%)
树干 Trunk	2 507	36.66	1 450.30	40.45
树皮 Bark	233	3.4	109.79	3.06
树枝 Branch	616	9.00	315.52	8.80
树叶 Leaf	344	5.03	166.05	4.63
树根 Root	976	14.27	511.33	14.26
乔木层 Arbores layer	4 676	68.38	2 552.99	71.21
灌木层 Shrub layer	1 140	16.67	568.97	15.87
草本层 Herb layer	677.5	9.90	313.95	8.76
地被物层 Ground cover layer	345.0	5.05	149.07	4.16
计 Total	6 838.5	100.00	3 584.98	100.00

表 13 云杉 (*Picea asperata*) 不同林型林分平均净生产量、碳素年净固定量
Table 13 The net production and carbon sequestration in different spruce stands ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

群落类型 Community type	林分密度 Density ($\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$)	林龄 Age (a)	净生产量 Net production					碳素年净固定量 Annual net carbon sequestration				
			乔木 Tree	灌木 Shrub	草本 Herb	地被物 Duff	计 Total	乔木 Tree	灌木 Shrub	草本 Herb	地被物 Duff	计 Total
偏干灌木-云杉 Dry shrub- <i>Picea asperata</i>	1 025	60	5 204	1 322.4	609.75	379.5	7 515.65	2 673	660.00	282.56	163.98	3 779.54
中生箭竹-云杉 Medium tagesia bamboo- <i>Picea asperata</i>	1 083	86	4 973	1 368	474.25	310.5	7 125.75	2 555	682.77	219.77	134.17	3 591.71
干性草类-云杉 Dry herb- <i>Picea asperata</i>	1 167	35	4 757	570	948.50	241.5	6 517.0	2 444	284.49	493.53	104.35	3 272.37
阴湿苔藓-云杉 Humid moss- <i>Picea asperata</i>	933	47	2 464	456	338.75	414.0	3 672.75	1 266	227.59	156.98	178.89	1 829.46

3 结论

1) 云杉天然林平均生物量达 $230.37 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中乔木层 $212.77 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占林分总现有量的 92.36%。

2) 云杉林乔木层各器官中碳密度变化范围在 47.12% ~ 57.85% ,其排列顺序为树干 > 树根 > 树枝 > 树叶 > 树皮。林分中,碳密度平均值各层分布为乔木层 51.37% ,灌木层 49.91% ,草本层 46.34%

和地被物层 43.21%。表明随植物个体高及组织木质化程度的降低,其碳密度呈降低趋势。土壤碳密度平均值为 1.41% ,随土层深度增加各层次土壤碳密度逐渐减少,在 0 ~ 100 cm 土层中,碳密度的变化为 2.69% ~ 0.83%。

3) 云杉树干碳贮量最高,达 $85.57 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占乔木层碳贮量的 72.11%。如果云杉被采伐利用,其碳贮量可以永久保存下来,成为缓冲性质的林产品碳库,对调节大气中碳周转速率和周转量

具有重大意义。

4) 云杉天然林生态系统碳库空间分布序列为土壤(0~100cm)>乔木层>灌木层>草本层>枯落物层>地被物层。4种典型群落碳库贮量中生箭竹-云杉林最高,达 $228.05 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,偏干灌木-云杉林次之,为 $168.95 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,干性草类-云杉林和阴湿苔藓-云杉林最低,分别只有 $90.74 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $63.22 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这是因为中生箭竹-云杉林和偏干灌木-云杉林多分布在高山峡谷或高山峡谷到丘状高原过渡带,沟形开豁且排水较好的半阳坡和阴坡以及山下部窄谷半阴坡,土壤多为褐色森林土或棕壤土,土壤透水透气性能较好,在云杉根系主要分布范围腐殖质较多,有机质、全氮、速效磷和活性钾均较多。由于土壤肥力较高,林地生境冷暖干湿适宜,是云杉生产力较高的群落类型,表现出较高的碳库贮量。而阴湿苔藓-云杉林多分布在海拔3300~3600m的丘状高原的阴坡和半阴坡下部河阶地,生境属性总的反映出湿而寒冷特性,土壤有机质分解不良,由于林内寒冷阴湿,苔藓层密积使土壤通气不良,土体中微生物活动特别弱而致使有机质分解缓慢,土壤肥力低。干性草类-云杉林多分布在3000~3400m丘状高原的阳坡和半阳坡,生境条件反映出干燥寒冷的特性。在云杉根系层(10~40cm)范围内腐殖质积累较少,全氮、速效磷和活性钾含量低,土壤水份缺乏,云杉生产力水平不高,这两种群落类型表现出较低的碳库贮量。

5) 云杉天然林分平均净生产量 $6838.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,乔木层净生产量为 $4676 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,占林分总量的68.36%,林分碳素年净固定量 $3548.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,乔木层碳素年净固定量 $2552.99 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,占林分总量的71.21%。据文献报道,马尾松天然林平均净生产量为 $5473 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (冯宗炜等,1982);杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林乔木层平均净生产量为 $8300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (潘维侑等,1982);火力楠(*Michelia macclurei*)人工林平均净生产量为 $27590 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (冯宗炜等,1983);日本落叶松(*Larix kaempferi*)人工林平均净生产量为 $3810 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (李学明,1984);洋槐(*Robinia pseudoaccacia*)乔木层平均净生产量为 $1550 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (陈灵芝,1986);栓皮栎(*Quercus variabilis*)人工林乔木层平均净生产量为 $2060 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (鲍显诚等,1984);樟树(*Cinnamomum camphora*)人工林平均净生产量 $12100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,乔木层平均净生产量为 $9550 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

(姚迎九等,2003)。从以上可看出:云杉天然林平均净生产量高于马尾松、落叶松、洋槐和栓皮栎等树种,低于中心产区的杉木和樟树人工林,低于南亚热带的火力楠。可见云杉具有较高的生产力和碳素固定能力。

6) 由于云杉分布区生境环境多样性,使林地植被具有一系列的生态地理特点,不同的群落结构而形成不同林地指示种,表现出不同群落类型,反映出不同生产力水平。在4种典型群落中,偏干灌木-云杉林分平均净生产量和碳素年净固定量最高,分别为 7515.65 和 $3779.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其次是中生箭竹-云杉林分别为 7125.75 和 $3591.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,再是干性草类-云杉林分别为 6517.0 和 $3272.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,湿润苔藓-云杉林平均净生产量和碳素年净固量最低,分别只有 3672.75 和 $1829.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

参 考 文 献

- Bao XC(鲍显诚)(1984). Biomass of Oriental oak forest. *Acta Phytoecologica et Geobotanic Sinica* (植物生态学与地植物丛刊), 8, 313-320. (in Chinese with English abstract)
- Chen LZ(陈灵芝)(1986). Biomass research of *Robinia pseudoaccacia* L. in Xi'shan, Beijing. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 28, 201-208. (in Chinese with English abstract)
- Fang JY, Chen AP, Peng CH(2001). Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292, 2320-2322.
- Fang X(方晰), Tian DL(田大伦)2003. Productivity and carbon dynamics of masson pine plantation. *Journal of Central South Forestry University*(中南林学院学报), 23(2), 11-15. (in Chinese with English abstract)
- Fang JY, Wang GG, Liu GH(1998). Forest biomass of China: an estimation based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications*, 8, 1084-1091.
- Feng ZW(冯宗炜)(1982). Biomass measure of *Pinus massoniana* in Huitong, Hunan. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 18(2), 127-134. (in Chinese with English abstract)
- Feng ZW(冯宗炜)(1983). Biomass and nutrient element distribution of *Michelia macclurei* artificial forest. *Journal of Northeast Forestry College* (东北林学院学报), 11(2), 13-19. (in Chinese with English abstract)
- Houghton RA, Hackler JL, Lawrence KT(1999). The US carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 285, 574-578.
- Jiang H(江洪)(1986). The preliminary analysis of net primary productivity in natural spruce forests. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 28, 538-548. (in Chinese with English abstract)
- Jiang H, Apps ML, Peng CH(2002). Modeling the influence of

- harvesting on Chinese boreal forest carbon dynamics. *Forest Ecology and Management*, 169, 65 – 82.
- Jiang H, Apps MJ, Zhang YL (1999). Modelling the spatial pattern of net primary productivity in Chinese forests. *Ecological Modeling*, 122, 275 – 288.
- Lei PF (雷丕锋), Xiang WH (项文化), Tian DL (田大伦) (2004). Carbon storage and distribution in *Cinnamomum camphora* Plantation. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 23 (4), 25 – 30. (in Chinese with English abstract)
- Li XM (李学明) (1984). Biomass measure of *Larix kaempferi*. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology* (四川林业科技), 5(1), 27 – 29. (in Chinese with English abstract)
- Ma MD (马明东) Liu YJ (刘跃建) (2006). Comparative analysis on the environmental factors of spruce stand through four mathematical methods. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 14(1), 196 – 210. (in Chinese with English abstract)
- Pan WC (潘维涛) (1981). Study on nutrient cycle of Chinese fir. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 1(1), 1 – 21. (in Chinese with English abstract)
- Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ (1982). Soil pools and world life zone. *Nature*, 298, 156 – 159.
- Woodwell GM, Whittaker RH, Reiners WA (1978). The biota and the world carbon budget. *Science*, 199, 141 – 146.
- Yao Y (姚迎九), Kang WX (康文星), Tian DL (田大伦) (2003). Study of the biomass and productivity of *Cinnamomum camphora* plantation. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 23(1), 1 ~ 5. (in Chinese with English abstract)
- Zhou GM (周国模), Jiang PK (姜培坤) (2004). Density storage and spatial distribution of carbon in *Phyllostachys pubescens* forest. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 40(6), 20 ~ 24. (in Chinese with English abstract)

责任编辑：彭少麟 责任编辑：姜联合