

川西亚高山次生桦木林恢复过程中的生物量、 生产力与材积变化

刘彦春, 张远东*, 刘世荣

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要: 采用空间代替时间的样地调查方法, 利用异速生长方程和一元材积表计算不同林龄桦木林的生物量、生产力与材积, 结果表明, 桦木林乔木层及平均单株地上生物量均随林龄增加而增加, 在 50 a 时达到最大; 生产力则先增加而后逐渐减少, 乔木层 30 a 时生产力为 $7.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 到 40 a 和 50 a 时, 分别下降到 $5.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $1.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 单株平均生产力在 30 a 时达到最大值 $1.13 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 40 a 时下降为 $0.96 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 50 a 时略有上升。林分蓄积量随林龄增加而增加, 平均生长量在 50 a 达到最大值 $3.78 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 连年生长量在 30 a 时达到最大值 $6.07 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。平均单株材积增长速度随林龄增加而增加, 50 a 时平均生长量和连年生长量达到最大值。

关键词: 生物量; 地上生产力; 材积; 桦木林; 植被恢复

Aboveground biomass, ANPP and stem volume of birch stands in natural restoration process of subalpine secondary forest in Western Sichuan

LIU Yanchun, ZHANG Yuandong*, LIU Shirong

Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

Abstract: Aboveground biomass, ANPP and stem volume of coniferous plantations have been studied in many papers in subalpine region of Western Sichuan, China. However, very few were reported about natural secondary birch forests (*Betula* spp.), which have become dominant types after over exploitation of old growth coniferous forests from 1950s to 1980s in this region. Aboveground biomass, aboveground net primary productivity (ANPP) and stem volume in birch forests with different stand age were calculated with allometric relationships and one-way tree volume models, respectively, by sampling stands with different age as a substitute for time series. The results indicated that aboveground biomass of tree layer as well as the average single tree increased with the increasing of stand age. Aboveground biomass of tree layer reached its peak at the 30 years old stand, that was $7.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and then slowed down gradually. Average individual aboveground biomass reached its maximum at the 30 years old stand, that was $1.13 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$. Stock volume of tree layer rose with the increasing stand ages, and the mean annual increment reached its maximum at the 50 years old stand, that is $3.78 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, while the current annual increment reached its peak at the 30 years old stand, that is $6.07 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$. Average individual stem volume also rose with the increasing stand ages, both mean annual increment and current annual increment reached the peak at the 50 years old stands.

Key Words: biomass; ANPP; stem volume; birch forest; vegetation restoration

基金项目: 林业公益性行业科研专项资助项目 (200804001); 国家自然科学基金资助项目 (30590383); 国家“十一五”科技支撑计划资助项目 (2006BAD03A0404)

收稿日期: 2008-12-04; 修订日期: 2009-03-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyd@caf.ac.cn

川西亚高山林区地处青藏高原东南缘和长江上游,森林资源极为丰富,主要森林类型是亚高山暗针叶林,这些森林集中分布于金沙江、雅砻江、岷江、大渡河等流域及其支流,不仅是我国西南高山林区木材生产基地和物种基因库,而且还是承担水源涵养、水土保持和维持长江流域生态安全等多种功能的绿色屏障^[1-2]。同时,该区地形复杂,新构造运动活跃,岩体松散,地震频繁,又是一个生态环境非常脆弱的地区。20 世纪 50 年代以来,随着川西亚高山森林的大规模开发利用,以冷杉(*Abies* spp.)为主要优势树种的原始暗针叶林被大面积采伐,之后陆续进行了以云杉(*Picea* spp.)为主要树种的人工更新^[1]。同时,在较为偏远和高海拔采伐迹地,以及伐后未及时完成人工更新的迹地则进行着以桦木(*Betula* spp.)等阔叶先锋树种为主的天然更新^[2]。1998 年,天然林资源保护工程正式启动,川西森林全面禁伐封育。在经历大规模采伐、人工更新及实施封育后,川西亚高山森林处于大规模的恢复之中,不同林龄的人工云杉林和天然次生林成为该区域最主要的森林类型^[3-7]。

近几十年来,由于大气 CO₂ 等温室气体浓度迅速上升而引起的全球变暖已是国际社会公认的全球性环境问题。森林生态系统对全球碳循环影响的研究倍受关注^[6]。森林生物量与生产力是森林碳循环的重要指标,而材积代表森林的木材生产能力。川西亚高山森林的大面积恢复,必将影响该区域碳循环过程和碳固定能力。目前对川西亚高山人工恢复的研究已相当丰富,内容主要包括凋落物产量,物种多样性,群落结构,土壤性状、生物量及生产力等,诸多学者分别对该地区的辐射松、峨眉冷杉、云杉、落叶松等人工林生物量与生产力先后展开研究^[8-15]。而关于该地区自然恢复次生林的研究相对较少,已有的研究涉及次生林的水文效应、群落物种组成及多样性、土壤性状^[16-18]等方面,但缺乏自然恢复次生桦木林的生物量、生产力与材积研究。

本文以川西米亚罗林区 20 世纪不同年代自然恢复的次生桦木(*Betula* spp.)林为研究对象,采用空间代替时间的方法,分析不同林龄桦木林的生物量、生产力以及材积变化规律,以期为评价亚高山地区自然恢复效果提供基础数据与科学依据。

1 研究区概况

研究区位于四川省理县米亚罗林区,地理坐标为 31°24′—31°55′N,102°35′—103°4′E。海拔在 2200—5500 m 之间,气候受着高原地形的决定性影响,属冬寒夏凉的高山气候。以海拔 2760 m 的米亚罗镇为例,全年降水量 700—1400mm,年蒸发量 1000—1900mm,1 月份均温 -8℃,7 月份均温 12.6℃,≥10℃ 的年积温为 1200—1400℃。米亚罗林区植被垂直成带明显,其类型和生境随海拔及坡向而有所差异。原生森林分布于海拔 2400—4200m 之间,以亚高山暗针叶林为主,优势树种为岷江冷杉(*Abies faxoniana* Rehd et Wils.)和紫果云杉(*Picea purpurea* Mast.)。1950—1978 年间进行过大规模皆伐,之后采伐量逐年减少,至 1998 年停采封育。采伐迹地初期多形成悬钩子(*Rubus* spp.)或箭竹(*Sinarundinaria nitida*)灌丛。1955 年以后,迹地上陆续开展了以粗枝云杉(*Picea asperata*)为主的人工更新。同时,迹地上以桦木为主的次生阔叶树种的天然更新也普遍发生,经灌丛、次生阔叶林、针阔混交林阶段向暗针叶林自然恢复^[19-20]。米亚罗森林土壤主要为山地棕壤,该地区乔木树种主要有冷杉(*Abies* spp.),云杉(*Picea* spp.),桦木(*Betula* spp.),铁杉(*Tsuga chinensis* Pritz),岷江柏(*Cupressus chengiana* S. Y. Hu),油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)等。

2 研究方法

通过查阅米亚罗林区森林经营资料、调查访问和实地考察,选择海拔、坡度、坡向及土壤等环境条件基本一致的各龄级次生桦木林 15 块。这些林分采伐前均为老龄暗针叶林,1953 年至 1985 年间陆续进行了采伐,之后自然恢复,没有明显的火烧、病虫害、放牧等干扰。林分年龄根据采伐年代确定。各样地面积 20 m × 20 m,记录海拔、经纬度坐标、坡度、坡向、坡位、优势树种等基本情况,目测林分郁闭度、灌木盖度和草本盖度,对所有样地进行每木检尺,测定林内乔木层(高于 5m)全部树木的胸径、树高和冠幅。灌木层(低于 5m),草本层,凋落物层及根系部分生物量因条件所限没有测算。样地基本情况见表 1。

根据异速生长方程计算单株各器官生物量,然后相加得单株生物量,单株生物量之和为样地生物量,然后换算成单位林地面积生物量。各树种本地区或附近地区异速生长方程见表 2。

表 1 米亚罗次生桦木林样地基本信息

Table 1 Outline of *Betula* spp. forests in Miyaluo, West Sichuan

林龄 Stand ages /a	优势树种 Dominance species	海拔 Elevation /m	坡向 Slope direction	坡度 Gradient /(°)	平均树高 Tree mean height/m	平均胸径 Mean DBH /cm	郁闭度 Canopy density
20	<i>B. albo-sinensis</i>	3452	NW50	35	8.06	9.41	0.33
20	<i>B. albo-sinensis</i>	3388	NE30	30	7.87	9.00	0.4
20	<i>B. albo-sinensis</i> <i>Sorbus</i> spp.	3378	W	28	6.81	5.40	0.3
30	<i>B. albo-sinensis</i>	3258	NE10	35	5.84	9.11	0.35
30	<i>B. albo-sinensis</i> <i>Sorbus</i> spp.	2955	NE40	45	9.43	8.97	0.45
30	<i>B. utilis</i> <i>Sorbus</i> spp.	3336	NE8	30	5.97	10.58	0.5
30	<i>B. utilis</i>	3270	N	30	12.35	15.28	0.44
40	<i>B. utilis</i> <i>Sorbus</i> spp.	3512	NW60	30	8.87	12.70	0.5
40	<i>B. utilis</i> <i>Acer</i> spp.	3100	NE10	45	9.37	13.22	0.55
40	<i>B. albo-sinensis</i> <i>Acer</i> spp.	3046	NW	30	10.39	9.15	0.55
40	<i>B. utilis</i>	3322	NE15	35	10.05	11.51	0.6
50	<i>B. albo-sinensis</i>	2940	NE35	35	14.54	12.03	0.6
50	<i>B. utilis</i>	3380	NW20	30	11.43	14.83	0.5
50	<i>B. utilis</i>	3227	NE20	30	12.42	16.75	0.8
50	<i>Acer</i> spp. <i>B. utilis</i> .	3058	NE30	45	10.07	10.95	0.75

表 2 川西亚高山次生林乔木地上生物量异速生长模型

Table 2 Allometric relationships for above-ground tree biomass in subalpine secondary forest in Western Sichuan

树种名称 Tree	树高与胸径关系 Height and breast relationships	地上部分器官 Organs of aboveground	异速生长方程 Allometric relationships	相关系数 Correlation coefficient	文献来源 Origin of references
冷杉 <i>Abies</i> spp.	$H = 45.7974 + \frac{-1837.2261}{D + 39.4060}$	干 Stem	$W = 0.0139 (D^2 \cdot H)^{1.0075}$	$R^2 = 0.9986$	[21]
		枝 Branch	$W = 0.0014 (D^2 \cdot H)^{1.0503}$	$R^2 = 0.9118$	
		叶 Leaf $D < 40\text{cm}$	$W = 0.0003 (D^2 \cdot H)^{1.2032}$	$R^2 = 0.9341$	
		$D > 40\text{cm}$	$W = 11.506 \ln(D^2 \cdot H) - 74.733$	$R^2 = 0.7539$	
云杉 <i>Picea</i> spp.	$H = \frac{D}{1.1295 + 0.0161 \times D}$	干 Stem	$W = 0.0405 D^{2.568}$	$R^2 = 0.9890$	[21]
		枝 Branch	$W = 0.0037 D^{2.7386}$	$R^2 = 0.9450$	
		叶 Leaf $D < 40\text{cm}$	$W = 0.0014 D^{2.9302}$	$R^2 = 0.9419$	
		$D > 40\text{cm}$	$W = 29.541 \ln D - 63.15$	$R^2 = 0.7574$	
桦木 <i>Betula</i> spp.	$H = 33.2727 - \frac{1031.4484}{D + 31.5493}$	干 Stem	$W = 0.14114 (D^2 \cdot H)^{0.7234}$	$R^2 = 0.9801$	[22]
		枝 Branch	$W = 0.00724 (D^2 \cdot H)^{1.0225}$	$R^2 = 0.7744$	
		叶 Leaf	$W = 0.01513 (D^2 \cdot H)^{0.8085}$	$R^2 = 0.8281$	
槭树 <i>Acer</i> spp.	$H = \frac{D}{0.841178 + 0.031825 \times D}$	干 Stem	$W = 0.3274 (D^2 \cdot H)^{0.7218}$	$R^2 = 0.9325$	[23]
		枝 Branch	$W = 0.01349 (D^2 \cdot H)^{0.7198}$	$R^2 = 0.9114$	
		叶 Leaf	$W = 0.02347 (D^2 \cdot H)^{0.6929}$	$R^2 = 0.8917$	
杨木 <i>Poplar</i> spp.	$H = \frac{D}{0.74623 + 0.042052 \times D}$	干 Stem	$W = 0.0537 (D^2 \cdot H)^{0.927}$	$R^2 = 0.987$	[23]
		枝 Branch	$W = 0.01245 (D^2 \cdot H)^{0.9504}$	$R^2 = 0.863$	
		叶 Leaf	$W = 0.0221 (D^2 \cdot H)^{0.7583}$	$R^2 = 0.786$	
其它阔叶树 Other broadleaf species	-	干 Stem	$W = 0.0097 (D^2 \cdot H) + 5.8252$	$R^2 = 0.9914$	[21]
		枝 Branch	$W = 0.051 (D^2 \cdot H) + 3.508$	$R^2 = 0.9825$	
		叶 Leaf	$W = 0.0004 (D^2 \cdot H) + 0.7563$	$R^2 = 0.9333$	

引用方程均为前人建立的该地区对应属的方程,同属异种间生长差异不大,不会对结论产生实质性影响,因此本文未做种别上的细分

林分生产力通过相邻两个林龄段生物量的差值除以时间间隔而求得:

$$S = \frac{Wp - Wq}{p - q},$$

式中, S 代表生产力, W 为某林龄时的生物量, p, q 分别为林龄。

通过各树种一元材积公式计算单株材积,相加得出样地材积,然后换算成单位林地面积材积。该地区各

树种的一元材积公式见表 3。单株平均生物量、生产力和材积为同林龄样地内每株林木生物量、生产力和材积的平均值,其计算公式如下:

$$\text{单株平均生物量} \quad W = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (W_{si} + W_{bi} + W_{li})$$

$$\text{单株平均生产力} \quad S_s = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (s_i)$$

$$\text{单株平均材积} \quad V = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (V_i)$$

$$\text{平均生长量} \quad \bar{v} = \frac{V_p}{p}$$

$$\text{连年生长量} \quad \bar{t} = \frac{V_p - V_q}{p - q}$$

式中, W_s, W_b, W_l 分别为树干, 树枝, 叶片生物量, V_i 为第 i 株树的材积, W_p, W_q, V_p, V_q 为对应林龄时的生物量、蓄积(材积), S_s 为单株平均生产力, s_i 为第 i 株林木的生产力。 $\bar{v}$ 是蓄积平均生长量, $\bar{t}$ 是蓄积连年生长量, m 为某一林龄时的样地个数, n 为样地内树木株数, p, q 为林龄。

表 3 四川一元立木材积表

Table 3 One-way tree volume models in Western Sichuan

树种 Tree	材积公式 Volume equation/m ³
桦木 <i>Betula</i> spp.	$V = 0.00004894 \times (0.9839 \times D - 0.3303)^{2.0173} \times \left(\frac{33.2727 - 1031.4484}{31.549 + D} \right)^{0.9388}$
冷杉 <i>Abies</i> spp.	$V = 0.00006322 \times (-0.1027 + 0.99576 \times D)^{1.901} \times \left(\frac{45.79737 - 1837.226}{D + 38.4064} \right)^{0.963}$
云杉 <i>Picea</i> spp.	$V = 0.00005679 \times (0.37388 + 0.9721 \times D)^{1.852} \times \left(\frac{D}{1.129 + 0.0161 \times D} \right)^{1.0335}$
杨树 <i>Poplar</i> spp.	$V = 0.00005275 \times (-0.5162 + 1.0942 \times D)^{1.94526} \times \left(\frac{D}{0.74623 + 0.0421 \times D} \right)$
槭树 <i>Acer</i> spp.	$V = 0.00005275 \times (0.49896 + 0.9661 \times D)^{1.945} \times \left(\frac{D}{0.84118 + 0.381} \right)^{0.93885}$

引自四川省森林资源清查办公室编, 四川省一元立木材积表 1980, 12, 49, 82, 121, 193

3 结果分析

3.1 自然恢复过程中生物量及生产力的变化

通过分析不同林龄桦木林乔木层及平均单株地上生物量和生产力的变化状况(表 4)可知, 自然恢复过程中林分乔木层生物量随着林龄的增加而不断上升, 树干、树枝、叶片生物量均在 50 a 时达到最大值, 分别为 98.0, 74.9, 12.1 t·hm⁻²。平均单株生物量也随林龄呈增加趋势, 各器官生物量也在 50 a 时达到最大值。乔木层树干生物量在 20 a 时只占总生物量的 45%, 30 a 时达到最大, 为 55%; 之后又下降到 50% 左右。对于平均单株生物量, 20a 时树干占 66%, 之后缓慢下降, 50a 时为 53%。

乔木层生产力先增加后减少, 在 30 a 时达到最大值 7.88 t·hm⁻²·a⁻¹; 之后不断下降, 50 年时为 1.19 t·hm⁻²·a⁻¹。单株平均生产力由 20 a 的 0.81 kg·a⁻¹ 增加到 30 a 的 1.13 kg·a⁻¹, 然后下降为 0.96 kg·a⁻¹, 在 50 a 时又略有上升。

林分密度先增大后减小。在 20 a 时, 密度最小仅为 1900 株·hm⁻², 30 a 和 40 a 时上升到 4600 株·hm⁻² 和 4500 株·hm⁻², 50 a 时又下降到 2300 株每公顷。这表明 40a 之后, 林分自然稀疏加剧。

从 20 a 到 30 a, 随林分密度和林龄增加, 林分乔木层生物量增加了近 2 倍。30 a 后, 林分密度开始下降,

尤其是 50 a 时林分密度相对于 40 a 时下降近一半,但林分生物量仍不断增加,说明个体因获得足够的环境资源而引起的生物量增加超过林分内弱小个体死亡而造成的生物量损失。

表 4 不同恢复阶段桦木林乔木层和单株平均地上生物量和生产力的变化

Table 4 Change of aboveground biomass, its distribution by organs and NPP of single tree and population in *Betula* spp. plantations of different stand ages

林龄 Stand age /a	密度 Density /(plant·hm ⁻²)	乔木层 Population				
		树干 Stem /(t·hm ⁻²)	树枝 Branch /(t·hm ⁻²)	叶片 Leaf /(t·hm ⁻²)	合计 Total /(t·hm ⁻²)	生产力 NPP /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
20	1900	19.3 ± 3.8	22.1 ± 14.4	2.7 ± 0.7	42.7 ± 12.8	2.14
30	4600	66.7 ± 15.7	46.0 ± 28.0	8.8 ± 2.2	121.5 ± 43.0	7.88
40	4500	88.8 ± 31.7	73.5 ± 48.1	9.8 ± 3.8	173.2 ± 58.5	5.17
50	2300	98.0 ± 14.4	74.9 ± 10.1	12.1 ± 4.2	185.1 ± 25.5	1.19
<i>F</i>		10.1 **	1.9	5.2 *	7.7 **	/

林龄 Stand age/a	密度 Density /(plant·hm ⁻²)	单株平均 Single tree				
		树干 Stem /kg	树枝 Branch /kg	叶片 Leaf /kg	合计 Total/kg	生产力 NPP /(kg·a ⁻¹)
20	1900	10.8 ± 3.6	3.6 ± 1.52	2.0 ± 0.7	16.3 ± 5.8	0.81
30	4600	16.9 ± 6.34	7.4 ± 3.9	3.3 ± 1.4	27.6 ± 11.6	1.13
40	4500	22.1 ± 9.5	10.7 ± 7.1	4.4 ± 2.2	37.1 ± 18.8	0.96
50	2300	28.2 ± 8.2	17.9 ± 7.9	1.9 ± 2.9	48.0 ± 17.2	1.09
<i>F</i>		6.7 **	7.1 **	6.8 **	6.9 **	/

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, $n = 15$ 采用单因素方差分析进行显著性检验

3.2 自然恢复过程中乔木层材积的变化

由表 5 可知,乔木层蓄积量及单株平均材积均随林龄增加而增加,同时,乔木层和单株桦木平均生长量也随林龄的增加而增加,分别在 50 a 时达到最大值 $3.78 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.39 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。林分连年生长量先增加后下降,在 30 a 时达到最大,为 $6.07 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。单株材积连年生长量表现为增加趋势,50 a 时达到最大值 $1.90 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 5 亚高山桦木次生林乔木层蓄积和单株材积逐年生长表

Table 5 Annual increments of stem volume of single tree and stock volume of stands in *Betula* spp. plantations

林龄 Stand age /a	密度 Density /(plant·hm ⁻²)	乔木层 Population/(m ³ ·hm ⁻²)			单株 Single tree/(1 × 10 ⁻³ m ³)		
		蓄积量 Stock volume	平均生长量 Annual growth	连年生长量 Current increment	材积 Stem volume	平均生长量 Annual growth	连年生长量 Current increment
20	1900	31.29 ± 4.96	1.56	1.56	17.02 ± 7.35	0.85	0.85
30	4600	92.04 ± 24.59	3.07	6.07	35.20 ± 18.25	1.17	1.82
40	4500	133.52 ± 27.9	3.34	4.15	50.55 ± 33.00	1.26	1.54
50	2300	189.23 ± 87.58	3.78	5.57	69.57 ± 28.56	1.39	1.90
<i>F</i>	4.75 *				7.25 **		

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, $n = 15$

当林分密度由 20 a 的 1900 株/hm² 增加到 30 a 的 4600 株/hm² 时,林分蓄积总量增加近 2 倍,平均、连年生长量也快速增长;30 a 后林分密度下降,蓄积量和平均生长量仍保持增加趋势。在 30 a 到 40 a 期间,密度下降幅度不明显,过密的林分状况已开始限制林木的生长,表现为连年生长量下降。在 50 a 时密度下降较大,自疏作用释放了林分部分空间和资源,林分生长速度加快,表现为连年生长量再次提高,这点也可在单株平均材积的连年生长量变化中得到证明。

4 结论与讨论

经过 20 世纪后半叶近 50 a 的采伐与更新,川西亚高山森林目前正处于大规模的人工及自然恢复中^[18],

因此有必要对两种恢复途径的效果进行比较分析。通过与该地区人工云杉林^[7]对比发现(图 1),在各林龄阶段,桦木林乔木层生物量均高于同龄级的人工云杉林,而单株平均生物量却都低于后者。桦木林乔木层总蓄积在 20 a 时略低于人工林,而在 30—50 a 都超过后者,平均生长量和连年生长量在 20—30 a 时低于云杉林,而在 50 a 时超过云杉林;桦木单株平均材积在 50 a 时为 0.069 m³要低于同期云杉的 0.1523 m³;在 50 a 以前,其生长量均略高于同龄级云杉,而且平均生长量和连年生长量也要高于云杉林。

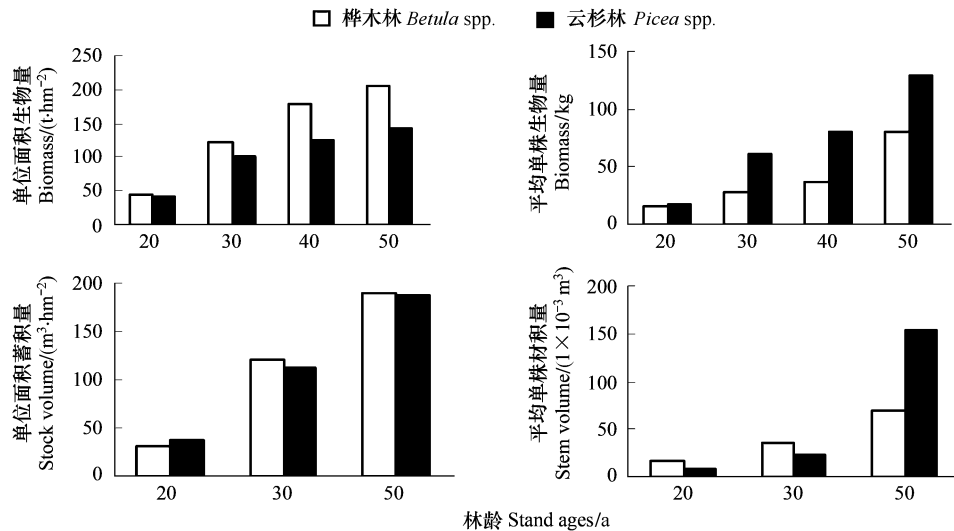


图 1 不同恢复途径同期云杉林与桦木林生物量和材积的比较

Fig. 1 Comparison of biomass and volume with different restoration

注:人工云杉林数据引自何海等^[7]

本研究所选样地与何海等^[7]所选人工云杉林样地在海拔、坡度等立地条件上基本类似,因此,两种恢复途径生物量与材积的差异及林分密度(图 2)和树种生长特性有关。

在恢复初期,云杉林密度略高于桦木林,但云杉乔木层生物量略低于桦木林。之后的各恢复阶段,桦木林密度均保持在同龄云杉林密度的 2 倍以上(图 2),林分乔木层生物量和蓄积量一直高于云杉林。随着桦木林密度的增加,生长所需的可利用空间和资源不断减少,桦木个体生长受到抑制;与桦木林相比,云杉林密度较小并且在不断下降,环境对个体生长的抑制性较小,因此单株云杉生物量高于桦木。在恢复初、中期云杉单株材积小于桦木,后期又明显高于桦木,这可能与光合产物在器官间分配的差异有关,在初期,桦木茎干物质比重高于云杉(桦木为 67%,云杉为 30%),前者单株材积也较大;之后桦木茎干比例逐渐下降,50 a 时已仅为 53%,而云杉茎干比例不断上升,50 a 时达到 60%,导致后期单株材积生长高于桦木。

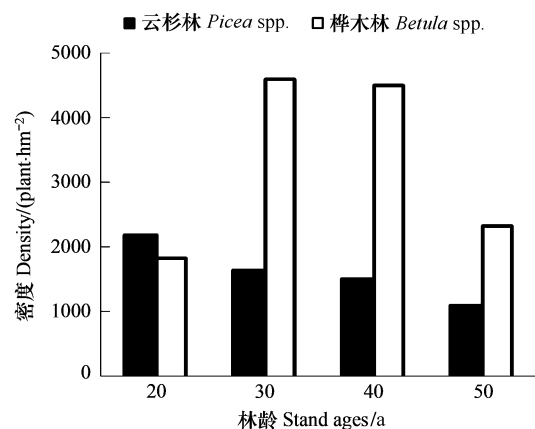


图 2 不同林龄云杉林与桦木林密度的比较

Fig. 2 Comparison of density with different restoration approaches in the same period

注:人工云杉林数据引自何海等^[7]

对川西亚高山暗针叶林采伐后自然恢复不同时期次生桦木林的研究表明:随着林龄的增加,桦木林乔木层及单株平均地上生物量均不断增加;生产力则先增加后减少。乔木层蓄积量及单株材积均随着林龄的增加而增加,平均生长量与连年生长量分别在 50 a 达到最大值。桦木单株材积逐年增加,且增长速度不断加快。

与该地区人工云杉林的研究对比发现,桦木林乔木层地上生物量要一直高于同龄级云杉林,而桦木单株生物量则低于同龄级人工云杉林。自然恢复乔木层蓄积在恢复前期要略低于人工云杉林,而在中后期则高于同龄级人工云杉林。单株材积在 30 a 以前,桦木的单株材积要略高于云杉林,而到 50 a 时桦木材积则明显落后于云杉材积。

同时,两种恢复途径的林地水文效应研究表明,人工云杉林恢复过程中林地持水效应的增强要快于自然恢复过程^[15,27]。液流测定结果则表明,人工云杉林乔木层生长季蒸散要高于桦木林^[28]。次生桦木林乔木层生产力高而蒸散耗水低,因而其水分利用效率要优于同龄级的人工云杉林。因此,自然恢复可以作为水源涵养区防护林恢复的重要途径。通常情况下,森林乔木层生物量占整个森林群落生物量的 90% 以上^[25-26],乔木层生物量与生产力的高低可以代表整个群落的水平。若从森林固碳角度来看,桦木林生物量和生产力要高于同龄级的人工云杉林;若是为获得较好的木材生产,尤其是大径材,可采用人工恢复并配合适当的经营措施,可获得较好的效果。随着全球气候变暖,各类生态环境问题不断凸现,森林经营也已经由过去单纯的木材生产转向到充分发挥森林的多种效益。因此,恢复植被时,应根据经营目标和实际情况,选择适宜的树种和恰当的森林恢复途径,在不同空间上进行搭配,以更好的发挥森林生态系统的多种服务功能。在本研究中,林龄根据采伐年代确定,其与人工云杉林的比较只是在龄级水平上,还不能得出确定性的统计学结论,二者的比较尚需要进一步的深入研究。另外,林分生物量和生产力还包括灌木层、草本层、凋落物层以及根系部分的研究有待深入。

References:

- [1] Yang Y P, Li C B. Sichuan Forest. Beijing: Chinese Forestry Press, 1992. 368.
- [2] Zhou D Z, Yang Y P. Preliminary studies on regeneration characteristic of birch in alpine forest of Western Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1980, 16(2): 154-156.
- [3] Jiang Y X. Community characteristic and classification principle of alpine dark coniferous forest in Miyaluo, West Sichuan. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1963, 1(1): 42-50.
- [4] Jiang Y X. The primary study on habitat type of alpine forest in Miyaluo and Markang, West Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1963, 8(4): 321-335.
- [5] Luo T X, Li W H, Luo J, Wang Q J. A comparative study on biological production of major vegetation types on the Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 823-831.
- [6] Fang J Y. Forest productivity in China and its response to global climate change. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 4(5): 513-517.
- [7] He H, Qiao Y K, Liu Q, Wu Y, Lin B. Dynamics of biomass and stem volume of *Picea asperata* stands in artificial restoration process of subalpine coniferous forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 748-752.
- [8] Wu Y, Liu Q, He H, Lin B. Dynamics of species diversity in artificial restoration process of subalpine coniferous forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1301-1306.
- [9] Lin B, Liu Q, Wu Y, He H, Qiao Y K. Dynamics of litters in artificial restoration process of subalpine coniferous forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1491-1496.
- [10] Wu Y, Liu Q, Qiao Y K, Pan K W, Zhao C M, Chen Q H. Species diversity changes in subalpine coniferous forests of different restoration stages and their effects on soil properties. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(6): 648-655.
- [11] Pan P, Mo C L, Mu J Y, Su Y M, He F, Liu X L, Wang M, Lan H, Feng Y C. Research on biomass and productivity of *Pinus radiata* plantations. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2005, 26(1): 22-29.
- [12] Su Y M, Liu X L, Xiang C H. Research on biomass and productivity of *Abies Fabri* plantations. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2000, 21(2): 31-36.
- [13] Pang X Y, Liu Q, Liu S Q, Wu Y, Lin B, He H, Zhang Z J. Changes of soil fertility quality properties under subalpine spruce plantation in Western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 263-270.
- [14] Liu Q, Wu Y, He H, Lin B. Ecological restoration process of subalpine coniferous plantations in Western Sichuan, China. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(5): 591-597.
- [15] Zhang Y D, Zhao C M, Liu S R. Woodland hydrological effects of spruce plantations and natural secondary series in sub-alpine region of Western Sichuan. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6): 713-719.
- [16] Ma J M, Liu S R, Shi Z M, Zhang Y D, Kang B, Chen B Y. Changes of species composition and diversity in the restoration process of sub-alpine dark brown coniferous forests in Western Sichuan, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(5): 17-25.
- [17] Hoshizaki K, Niiyama K, Kimura K, Yamashita T, Bekku Y, Okuda T, Quah E. Temporal and spatial variation of forest biomass in relation to stand dynamics in a mature, lowland tropical rainforest, Malaysia. *Ecological Research*, 2004, 19: 357-363.

- [18] Zhang Y D, Liu S R, Ma J M, Shi Z M, Liu X L. Woodland hydrological effects of birch forests in sub-alpine region of Western Sichuan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2939-2946.
- [19] Zhang X Y, Du W B, Zhang X P, Wang J X, Li D Y, Cai X H. Soil microbes evaluation and the relation with soil factors during the vegetation restoration in Western Sichuan. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5): 1470-1474.
- [20] Segura M, Kanninen M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica*, 2005, 37(1): 2-8.
- [21] Luo T X, Shi P L, Luo J, Ou Y H. Distribution patterns of aboveground biomass in Tibetan alpine vegetation transects. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(6): 668-676.
- [22] Feng Z W, Wang X K, Wu G. Biomass and production of forest ecosystem in China. Beijing: Science Press, 1999.
- [23] Chen C G. Biomass regression equation of broad-leaved Korean pine forest. *Yanbian Forestry Science and Technology*, 1983, (1): 2-19.
- [24] Zhu X W, Xiao Y, Tian L H. Empirical formula and analysis on yield determination of leaf, branch, root in natural mountain poplar secondary forest. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 1988, (1): 30-34.
- [25] Luo J, Yang Z, Yang Q W. A study on the biomass and production of forest on the Gongga Mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 191-196.
- [26] Ma M D, Jiang H, Luo C D, Liu Y J. Preliminary study of carbon density, net production and carbon stock in natural spruce forests of Northwest sub-alpine Sichuan, China. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 305-312.
- [27] Zhang Y D, Zhao C M, Liu S R. The influence factors of sub-alpine forest restoration in Miyaluo, West Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(4): 189-193.
- [28] Zhang L. Spatial-temporal variations of water use of indigenous tree species in upstream catchment of Minjiang — A case study of sapflow measurement (Master degree thesis). Chinese Academy of Forest, 2008: 78-80.

参考文献:

- [1] 杨玉坡, 李承彪. 四川森林. 北京: 中国林业出版社, 1992: 368.
- [2] 周德彰, 杨玉坡. 四川西部高山林区桦木更新特性的初步研究. *林业科学*, 1980, 16(2): 154-156.
- [3] 蒋有绪. 川西米亚罗高山暗针叶林的群落特点及其分类原则. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1963, 1(1): 42-50.
- [4] 蒋有绪. 川西米亚罗、马尔康高山林区生境类型的初步研究. *林业科学*, 1963, 8(4): 321-335.
- [5] 罗天祥, 李文华, 罗辑, 王启基. 青藏高原主要植被类型生物生产量的比较研究. *生态学报*, 1999, 19(6): 823-831.
- [6] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 513-517.
- [7] 何海, 乔永康, 刘庆, 吴彦, 林波. 亚高山针叶林人工恢复过程中生物量和材积动态研究. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 748-752.
- [8] 吴彦, 刘庆, 何海, 林波. 亚高山针叶林人工恢复过程中物种多样性的变化. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1301-1306.
- [9] 林波, 刘庆, 吴彦, 何海, 乔永康. 亚高山针叶林人工恢复过程中凋落物动态分析. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1491-1496.
- [10] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 潘开文, 赵常明, 陈庆恒. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 648-655.
- [11] 潘攀, 慕长龙, 牟菊英, 宿以明, 何飞, 刘兴良, 汪明, 兰海, 冯永超. 辐射松人工幼林生物量和生产力研究. *四川林业科技*, 2005, 26(1): 22-29.
- [12] 宿以明, 刘兴良, 向成华. 峨眉冷杉人工林分生物量和生产力研究. *四川林业科技*, 2000, 21(2): 31-36.
- [13] 庞学勇, 刘庆, 刘世全, 吴彦, 林波, 何海, 张宗锦. 川西亚高山云杉人工林土壤质量性状演变. *生态学报*, 2004, 24(2): 263-270.
- [14] 刘庆, 吴彦, 何海, 林波. 川西亚高山人工针叶林生态恢复过程的种群结构. *山地学报*, 2004, 22(5): 591-597.
- [15] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西亚高山人工云杉林和自然恢复演替系列的林地水文效应. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 713-719.
- [16] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 张远东, 康冰, 陈宝玉. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中群落物种组成和多样性的变化. *林业科学*, 2007, 43(5): 17-25.
- [17] 张远东, 刘世荣, 马姜明, 史作民, 刘兴良. 川西亚高山桦木林的林地水文效应. *生态学报*, 2005, 25(11): 2939-2946.
- [18] 张秀艳, 杜卫兵, 张小平, 王金锡, 李登煜, 蔡小虎. 川西植被恢复过程中的土壤微生物评价及与土壤因子的关系. *生态环境*, 2007, 16(5): 1470-1474.
- [19] 罗天祥, 石培礼, 罗辑, 欧阳华. 青藏高原植被样带地上部分生物量的分布格局. *植物生态学报*, 2002, 26(6): 668-676.
- [20] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999.
- [21] 陈传国. 阔叶红松林生物量的回归方程. *延边林业科技*, 1983, 1: 2-19.
- [22] 朱兴武, 肖瑜, 田联会. 山杨天然次生林叶、枝、根产量测定的经验公式及其分析. *青海农林科技*, 1988, 1: 30-34.
- [23] 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山森林生物量和生产力的研究. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 191-195.
- [24] 马明东, 江洪, 罗承德, 刘跃建. 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. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 305-312.
- [25] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西米亚罗林区森林恢复的影响因子分析. *林业科学*, 2005, 41(4): 189-193.
- [26] 张雷. 基于液流技术的岷江上游典型乔木树种水分利用的时空变异性研究 (硕士论文). 中国林科院. 2008, 78-80.