

秦岭火地塘林区红桦林生物量和蓄积量变化研究

马俊,党坤良*,王连贺,杨士同

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100)

摘要:以秦岭火地塘林区红桦林为研究对象,设置 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 调查样地48块,获得地形和林分的相关数据。采用树木年轮学方法分析其生物量、蓄积量和生产力的动态变化,使用差异性分析研究不同海拔、坡度、坡向间红桦林生物量、蓄积量和生产力的变化,运用相关性分析和偏相关分析研究林龄和林分密度与红桦林生物量、蓄积量和生产力参数的关系,采用主成分分析和回归分析研究红桦林生物量和蓄积量的主要影响因子并得出回归模型。结果表明,红桦林生物量、蓄积量和生产力随海拔增大而减小,随坡度增大而增大,不同海拔、坡度间生物量和蓄积量差异性显著($p<0.05$),生产力差异性不显著($p>0.05$),不同坡向间,阳坡红桦林生物量、蓄积量和生产力均显著大于阴坡;相关性分析表明,红桦林生物量、蓄积量和生产力与林分年龄呈显著性正相关关系;偏相关分析表明生物量、蓄积量和生产力与林分密度呈显著性正相关关系;主成分分析表明,特征值 >1 的3个主成分对林分生物量和蓄积量的方差累积贡献率为79.95%;回归分析表明,海拔、坡度、坡向、林龄和林分密度是影响红桦林生物量和蓄积量的主要因子;估算红桦林生物量的模型为 $B=0.137fd+10.627sta-2.855sla+0.007g+0.002e-307.311$,估算红桦林蓄积量的模型为 $V=0.125fd+12.308sta-10.174sla-0.320g+0.013e-369.848$ 。

关键词:火地塘林区;红桦林;生物量;蓄积量;生产力

中图分类号:S792.15 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)03-0204-07

Research on the Changes in Biomass and Volume of *Betula albo-sinensis*
Forest at Huoditang Region

MA Jun, DANG Kun-liang*, WANG Lian-he, YANG Shi-tong

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: *Betula albo-sinensis* forest occurring at Huoditang region was used as research object. Forty eight plots each with an area of $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ were set up to collect the data related to terrain and stand. The dendrochronology and mathematical analysis methods were adopted in the study. The results showed that the volume and productivity decreased as the increase of altitude, increased as the increase of slope. There existed significant difference in biomass and volume between different altitudes and slopes ($p<0.05$) and the difference was not significant in productivity ($p>0.05$). The volume and productivity at sunny slope were significantly more than those in shady slope ($p<0.05$). Correlation analysis showed that significantly positive correlations existed between biomass, volume, productivity and stand age; between biomass, volume, productivity and stand density ($p<0.05$). Principal component analysis demonstrated that the three principal components of biomass and volume eigenvalues more than 1 cumulative contribution of variance accounted 79.95%. Regression analysis showed that altitude, slope, aspect, stand age, and stand density were the main factors affecting the biomass and volume of *B. albo-sinensis* forest. The model to estimate the biomass

收稿日期:2015-07-20 修回日期:2015-08-10

基金项目:林业公益性行业专项(201204502)。

作者简介:马俊,男,在读硕士,研究方向:森林生态学。E-mail:344693673@qq.com

*通信作者:党坤良,男,副教授,研究方向:森林抚育。E-mail:dangkl@126.com

was established as $B=0.137fd+10.627sta-2.855sla+0.007g+0.002e-307.311$, the model to estimate the volume was $V=0.125fd+12.308sta-10.174sla-0.320g+0.013e-369.848$.

Key words: Huoditang region; *Betula albo-sinensis* forest; biomass; volume; productivity

森林生物量是森林生态系统积累的植物有机物总量,是衡量森林生产力的重要指标之一,其变化反映了森林的演替、人类活动、自然干扰和气候变化等,也是度量森林结构功能变化的重要依据^[1-2]。森林蓄积量是森林面积上存在着的林木树干部分的总材积,它是反映一个国家或地区森林资源总规模和水平的基本指标之一,也是反映森林资源的丰富程度、衡量森林生态环境优劣的重要依据^[3]。准确估算森林生物量、蓄积量对研究生产力、碳循环及其在调节气候方面的作用具有十分重要的意义^[4-5]。传统监测森林生物量和蓄积量动态变化的方法主要为固定样地法和遥感估算法。其中固定样地法的应用最为普遍,即周期性重复测定样地内树木生长指标来估算生物量和蓄积量的动态变化^[6],此方法准确性较高,但通常观测周期较长且难以满足年尺度内森林过程评价的需要;遥感估算法一般用于宏观监测森林生态系统生物量动态变化^[7],但其数据很难反映森林内部一些细微变化,精确性也受遥感影像分辨率的限制。鉴于传统调查方法的不足,树木年轮学方法因其在获取不同地形因子和林分因子条件下森林生物量、蓄积量和生产力的动态特征和更详细的年分辨率数据方面具有独特优势而被广泛应用^[8-9]。

红桦(*Betula albo-sinensis*)林为秦岭火地塘林区主要森林类型之一,在海拔2 000~2 400 m区域分布广泛,其在水源涵养、水土保持和维持区域生态平衡等方面有突出的生态功能^[10]。已有科研人员对红桦林进行了一些研究,主要集中于林分结构^[11]、更新特征^[12]、碳水化合物含量与分配对大气CO₂浓度升高的响应^[13]等方面,但是对红桦林不同立地类型条件下生物量、蓄积量和生产力的变化研究较少。本研究运用树木年轮学方法,以不同立地条件红桦林生物量和蓄积量为研究内容,分析不同地形因子和林分因子条件下红桦林生物量和蓄积量的分布特征,探索影响红桦林生物量和蓄积量的主要因子及其耦合关系,并为红桦林的科学经营提供理论基础,对其营林措施的制定具有重要意义。

1 研究区概况

秦岭火地塘林区位于秦岭南坡中段的陕西省宁陕县境内(108°24'00"-108°36'10"E, 33°34'00"-33°22'00"N),总面积21 152.0 hm²,森林覆被率高达

93.8%。该区海拔1 260~2 679 m,年均温10.3℃,最高气温36.2℃,最低气温-13.1℃,年均降雨量1 044 mm。土壤主要为黄棕壤、棕壤和暗棕壤,平均厚度50 cm左右,成土母岩主要有花岗岩、片麻岩、变质砂岩和片岩。植被垂直带自下而上主要有山地针阔混交林带(1 400~2 000 m),由油松锐齿栎林亚带(1 400~1 800 m)和华山松红桦林亚带(1 800~2 000 m)构成;桦木林带(2 000~2 400 m);亚高山针叶林带(2 400~3 200 m),由巴山冷杉林亚带(2 400~2 600 m)和太白红杉林亚带(2 600~3 200 m)构成;高山灌丛带(≥3 200 m)。红桦在海拔2 000~2 400 m的阳坡和阴坡均分布广泛,主要的伴生树种为华山松(*Pinus armandii*)、山杨(*Populus davidiana*)、灯台树(*Bothrocaryum controversum*)、陕甘花楸(*Sorbus koehneana*)、领春木(*Euptelea pleiospermum*)和枫杨(*Pterocarya stenoptera*)等。

2 材料与方法

2.1 样地设置与调查

秦岭火地塘林区红桦林主要分布在海拔2 000~2 400 m,根据其分布情况,于2013年7—9月,沿不同的海拔按照不同坡向设置48个面积为20 m×20 m的样地。样地调查时记录海拔、坡度、坡向并每木检尺记录胸径、树高。根据样地胸径调查数据,以2 cm为一个径级分组。每个径级选取1~2株红桦钻取树芯,在钻取树芯时沿着平行山坡等高线的方向,由于红桦没有针叶树分泌树脂的功能,因此,钻芯后用与钻孔相同粗细的树枝堵塞钻孔以防止滋生病虫害^[8]。取出树芯后确认所取树芯过髓心,否则重新选取。当场测量木芯长度并用白纸裹好并封口,白纸上标明树芯的胸径、编号等信息。最后在内业处理时再次测量自然风干后的树芯长度,经测定,本研究树芯干湿长度比为98.6%,树芯因风干引起的缩水较小,因此在后期计算生物量时忽略不计。

为减小林分年龄的差异造成对不同海拔红桦林生物量、蓄积量和生产力影响的干扰,选择林分平均年龄40 a左右,设置4个海拔梯度,每个梯度相差100 m,每个海拔梯度选取3个样地进行分析。

2.2 立地因子划分

按照《西北主要树种培育技术》^[14]立地因子等级划分方法,并结合野外调查实际,立地因子的划分

如下:坡向分为阴坡(西北、正北、东北、正东)和阳坡(东南、正南、西南、正西)2个等级;坡度分为缓坡($8\sim15^\circ$)、斜坡($15\sim30^\circ$)和陡坡($30\sim38^\circ$)3个等级。

2.3 样芯处理

定制固定树芯的木槽,将木槽表面打磨光滑,用胶将树芯固定在木槽内,先用粗砂纸将木芯打磨抛光,接着再用细砂纸打磨光滑。红桦为阔叶树,年轮清晰度较差,树轮界限不够清晰,在轮宽测量前使用沾过清水的毛刷在树芯表面进行涂刷,以增加早晚材对比度,以利于年轮测量^[8],并及时用铅笔描出。交叉定年后用 Win DENDROTM 年轮分析系统扫描样芯,通过扫描图像测量轮宽,精确到 0.001 cm。

2.4 生长指标的估算

$$\text{单木胸径 } D_n = D_{2014} - (W_{2013} + W_{2012} + \dots + W_{n+2} + W_{n+1}) \quad (1)$$

式中 D_n 表示 n 年的胸径, W_n 表示 n 年单木 2 个树芯轮宽之和^[9]。

根据胸径数据,利用陈存根^[15]等基于大量观测数据建立的胸径-树高方程计算得到对应树高,借鉴当地已有生物量和材积回归模型分别计算不同径

级单木生物量、蓄积量。对样地调查胸径数据进行处理得出每个径级样地内株数并最终求得各样地生物量、蓄积量,样地生产力利用相邻 2 a 生物量相减求得,采用树木年轮学方法推算研究区 1993 年到 2014 年逐年生物量、蓄积量和生产力。

2.5 数据处理

用 Excel 和 SPSS 18.0 软件进行数据处理和作图,对研究区红桦林生物量、蓄积量和生产力影响因子进行方差分析、 t -检验、相关性分析、偏相关分析、主成分分析和回归分析。

3 结果与分析

3.1 秦岭火地塘林区红桦林林木径级分布

研究区红桦林林木径级分布接近倒“J”型,18 径级以下的小径级林木个体占总数的 80% 以上,大径级林木株数较少,是典型增长型异龄林林木径级分布结构(图 1)。林下乔木自幼苗更新后因自然选择,部分幼苗成长为大径级乔木,其他幼苗由于光照、水分的条件的限制被淘汰。红桦林 6 径级林木株数较少。

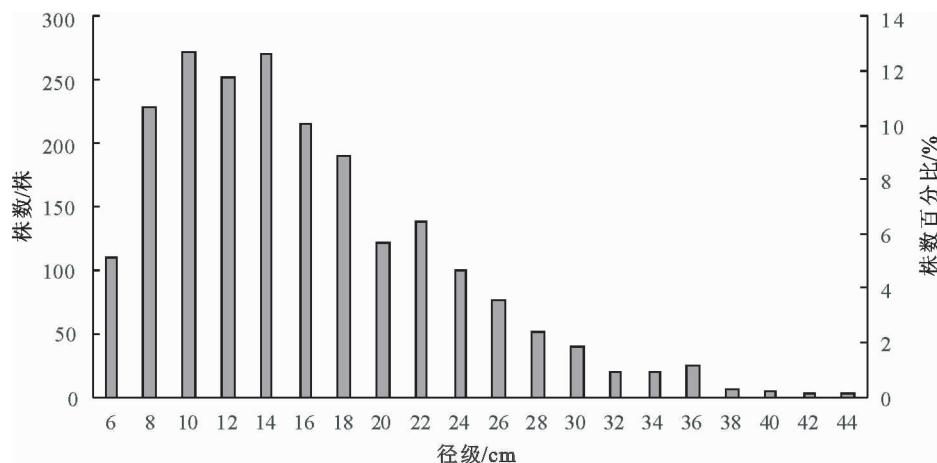


图 1 秦岭火地塘林区红桦林林木径级分布

Fig. 1 Frequency distribution of tree size (DBH) of *B. albosinensis* forest at Huoditang region in the Qinling Mountains

3.2 秦岭火地塘林区红桦林乔木层蓄积量、生物量和生产力的动态变化

研究区红桦林乔木层蓄积量逐年增大(图 2),从 1993 年 $63.20 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 增长到 2014 年 $170.16 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,增长了 $106.96 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,年均增长 $5.35 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其连年变化图表明,研究起始时间红桦林蓄积量增长缓慢,到 2000 年,曲线斜率增大,增长速率加快,随着时间的推移,其增长速率又趋于平缓。生物量随时间逐年递增,从 1993 年 $50.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增长到 2014 年 $156.40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,增长了 $105.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,年均增长 $5.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其连年变化图表明,从 1993 年到 1997 年,生长曲线斜

率较小,增长速度较为缓慢,随着时间的推移,其生物量增长加快。相比蓄积量的增长,生物量快速增长时间要早于蓄积量。

研究区红桦林生产力从 1993 年 $3.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 波动上升到 2009 年 $7.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,随后又有波动下降的趋势。

3.3 影响秦岭火地塘林区红桦林生物量、蓄积量和生产力的因素分析

3.3.1 海拔对红桦林生物量、蓄积量和生产力的影响 红桦林生物量、蓄积量和生产力均随海拔升高呈逐渐减小的趋势(表 1),其中生物量沿海拔梯度从低到高分别为 239.52 ± 14.64 、 203.75 ± 8.43 、

179.45 ± 4.10 、 $151.98 \pm 10.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 各海拔梯度间生物量差异性显著($p < 0.05$);蓄积量沿海拔梯度从低到高分别为(212.38 ± 23.40)、(166.34 ± 6.49)、(132.65 ± 12.46)、(108.06 ± 9.60) $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, $2000 \sim 2300 \text{ m}$ 各海拔段间蓄积量差异显著($p < 0.05$), $2200 \sim 2300 \text{ m}$ 和 $2300 \sim 2400 \text{ m}$ 海拔段间蓄积量差异不显著($p > 0.05$);生产力沿海拔梯度从低到高分别为(7.75 ± 1.11)、(7.19 ± 0.23)、(6.43 ± 0.69)、(5.34 ± 0.39) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 除 $2000 \sim 2100 \text{ m}$ 和 $2300 \sim 2400 \text{ m}$ 海拔段间生产力差异显著($p < 0.05$), 其他各海拔段间生产力差异均不显著($p > 0.05$), 但有逐渐减小的趋势。海拔的升高引起温度、湿度等自然条件的变化, 温度的变化影响林分生产力的大小, 降雨引起的林分湿度差异也在一定程度上影响了林分生物量和蓄

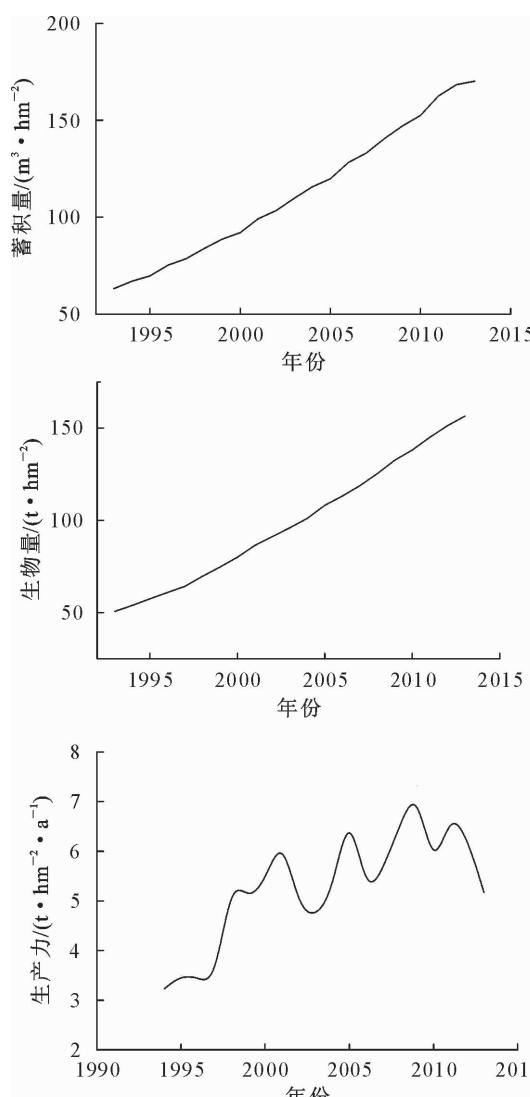


图2 秦岭火地塘林区红桦林 1993—2014年生物量、蓄积量和生产力的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes in biomass, volume and productivity of *B. albo-sinensis* forest from 1993 to 2014 at Huoditang region

积量的积累,因此造成了不同海拔段生物量、蓄积量和生产力的差异。

表1 不同海拔红桦林生物量、蓄积量和生产力的变化

Table 1 Changes in biomass, volume and productivity of *B. albo-sinensis* forest at different elevations

海拔/m	生物量 /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	蓄积量 /($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	生产力 /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
2 000~2 100	239.52 ± 14.64 a	212.38 ± 23.40 a	7.75 ± 1.11 a
2 100~2 200	203.75 ± 8.43 b	166.34 ± 6.49 b	7.19 ± 0.23 a
2 200~2 300	179.45 ± 4.10 c	132.65 ± 12.46 c	6.43 ± 0.69 ab
2 300~2 400	151.98 ± 10.51 d	108.06 ± 9.60 c	5.34 ± 0.39 b

3.3.2 坡度和坡向对红桦林生物量、蓄积量和生产力的影响 红桦林生物量阴坡为(164.03 ± 41.54) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 阳坡为(199.11 ± 51.00) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 蓄积量阴坡为(142.35 ± 41.98) $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 阳坡为(188.90 ± 66.91) $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 生产力阴坡为(5.83 ± 1.03) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 阳坡为(7.09 ± 1.49) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。统计分析结果(表2)表明,红桦林生物量,蓄积量和生产力均在不同坡向间存在差异,且差异显著($p < 0.05$)。对于不同坡度,红桦林生物量在缓坡为(149.94 ± 38.25) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,斜坡为(181.05 ± 45.50) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,陡坡为(213.71 ± 43.49) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,蓄积量在缓坡为(130.56 ± 44.39) $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,斜坡为(164.74 ± 59.93) $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,陡坡为(201.57 ± 55.20) $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,生产力在缓坡为(5.83 ± 0.93) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,斜坡为(6.31 ± 1.43) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,陡坡为(7.23 ± 1.51) $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。红桦林生物量和蓄积量均在不同坡度间存在差异,且差异显著,生产力在缓坡与斜坡、斜坡与陡坡间差异不显著($p > 0.05$),但在缓坡与陡坡之间差异显著。

表2 不同坡向、坡度红桦林生物量、蓄积量和生产力的变化

Table 2 Changes in biomass, volume and productivity of *B. albo-sinensis* forest at different aspects and slopes

		生物量 /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	蓄积量 /($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	生产力 /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
坡向	阴坡	164.03 ± 41.54 a	142.35 ± 41.98 a	5.83 ± 1.03 a
	阳坡	199.11 ± 51.00 b	188.90 ± 66.91 b	7.09 ± 1.49 b
坡度	缓坡	149.94 ± 38.25 a	130.56 ± 44.39 a	5.83 ± 0.93 a
	斜坡	181.05 ± 45.50 b	164.74 ± 59.93 b	6.31 ± 1.43 ab
	陡坡	213.71 ± 43.49 c	201.57 ± 55.20 c	7.23 ± 1.51 b

3.3.3 林龄和林分密度对红桦林生物量、蓄积量和生产力的影响 生物量、蓄积量和生产力均随林龄增大而增大(图3),相关分析表明,红桦林生物量、蓄积量和生产力均与林龄呈极显著的正相关关系,其Pearson相关系数分别为0.860、0.868和0.803。对于林分密度而言,随着林龄的增长,林分自身可能存在自然稀疏过程,为消除林龄的影响,对林分密度

与生物量、蓄积量和生产力的关系进行偏相关分析表明,红桦林生物量、蓄积量和生产力与林分密度呈显著的正相关关系,其偏相关系数分别为 0.810、0.618 和 0.431。林分密度的增大可能会导致林木单株生物量、蓄积量和生产力的下降,但对于林分整体而言,其生物量、蓄积量和生产力是随林分密度增大而增大的。

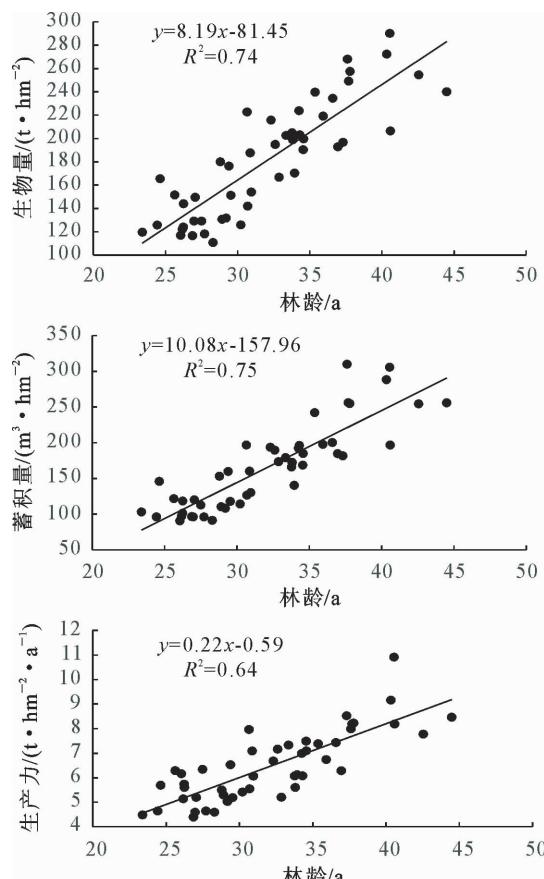


图 3 不同林龄红桦林生物量、蓄积量和生产力的变化

Fig. 3 Changes in biomass, volume and productivity of *B. albo-sinensis* forest at different stand ages

3.4 影响红桦林生物量和蓄积量因子的主成分分析

所有主成分中特征值 >1 的主成分有 3 个,其方差累积贡献率为 79.95%,能反映不同因子对红桦林生物量和蓄积量影响效应的绝大部分信息。第 1 主成分中林分密度的载荷较高,其方差贡献率为 39.73%,第 2 主成分中坡度和坡向的载荷较高,其方差贡献率为 23.72%,第 3 主成分中海拔的载荷较高,其方差贡献率为 16.50%(表 3)。

3.5 影响红桦林生物量和蓄积量因子的回归分析

对林分生物量和蓄积量影响因子进行多元线性回归分析,得到关于林分密度(forest density, fd)、林龄(stand age, sta)、坡向(slope aspect, sla)、坡度(gradient, g)、海拔(Elevation, e)的回归模型。

生物量(B)影响因子回归模型方程 F 值为 49.864,多元相关系数 $R=0.925$ 。

$$B=0.137fd+10.627sta-2.855sla+0.007g+0.002e-307.311$$

蓄积量(V)影响因子回归模型方程 F 值为 49.864,多元相关系数 $R=0.925$ 。

$$V=0.125fd+12.308sta-10.174sla-0.320g+0.013e-369.848$$

表 3 生物量和蓄积量的主成分因子载荷

Table 3 Factors loading for biomass and volume on principal component

因子	成分		
	1	2	3
海拔/m	-0.303	0.085	0.889
坡度	-0.472	0.635	0.173
坡向	0.270	0.662	0.370
林龄/a	0.777	0.351	0.100
林分密度/(株·hm⁻²)	0.885	0.404	0.124
郁闭度	0.781	0.537	0.083

4 结论与讨论

秦岭火地塘林区红桦林 1996 年平均生物量为 $75.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均蓄积量 $60.83 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 低于陈存根、刘华^[15-16]等生物量 $133.38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 蓄积量 $109.30 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 其原因可能是研究区红桦林有较大的人为干扰,期间经历了大面积砍伐,导致本研究在用树木年轮学反演时有较大的偏差,但到了 2014 年,研究区红桦林平均生物量为 $170.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均蓄积量 $156.40 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 表明研究区红桦林生物量和蓄积量较之前有所增加,因为较大强度的人为干扰造成红桦林的大面积林窗,红桦作为一种喜光的先锋树种,更新较快,迅速占据林窗并产生大量幼树,随着时间的推移,更新的幼树与保留的母树重新构建新的红桦林。研究区红桦林生物量年平均增长 $5.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 蓄积量年平均增长 $5.35 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 高于杨凤萍^[9]等油松林和华山松林生长速率,其原因可能是红桦林是一种先锋速生树种,且本研究中红桦林为林分从幼龄林进入到中林龄阶段,故而生长速率较快。而红桦林生产力随时间先波动上升,后波动下降,与杨凤萍^[9]等研究结果基本相似。

红桦林最适海拔为 2 000 m 左右,高于或低于最适海拔,其林分生物量、蓄积量均会减小^[15]。本研究中红桦林分布海拔为 2 000~2 400 m,生物量、蓄积量和生产力随海拔升高逐渐减小,与上述研究结果一致。不同坡向造成林木生长所需的养分、光

照、土壤水分和气温等微环境的变化,从而形成有林地生物量、蓄积量和生产力的差异^[17]。坡向引起森林生物量和蓄积量变化,且阳坡生物量和蓄积量大于阴坡^[18],本研究中红桦林生物量、蓄积量和生产力不同坡向间亦存在显著差异,阳坡平均生物量(199.11 ± 51.00) $t \cdot hm^{-2}$,蓄积量(188.90 ± 66.91) $m^3 \cdot hm^{-2}$,生产力(7.09 ± 1.49) $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,阴坡平均生物量(164.03 ± 41.54) $t \cdot hm^{-2}$,蓄积量(142.35 ± 41.98) $m^3 \cdot hm^{-2}$,生产力(5.83 ± 1.03) $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,阳坡生物量、蓄积量和生产力均显著高于阴坡,与上述结论一致。秦岭中段南坡油松林生态系统碳密度和蓄积量随坡度增大呈现先增大后减小趋势,且在 $26^\circ \sim 35^\circ$ 范围内达到最大值^[18],本研究中红桦林分布坡度为 $8^\circ \sim 35^\circ$,红桦林生物量、蓄积量和生产力均随坡度的增大而增大,其平均生物量缓坡为(149.94 ± 38.25) $t \cdot hm^{-2}$,斜坡为(181.05 ± 45.50) $t \cdot hm^{-2}$,陡坡为(213.71 ± 43.49) $t \cdot hm^{-2}$;平均蓄积量缓坡为(130.56 ± 44.39) $m^3 \cdot hm^{-2}$,斜坡为(164.74 ± 59.93) $m^3 \cdot hm^{-2}$,陡坡为(201.57 ± 55.20) $m^3 \cdot hm^{-2}$;平均生产力在缓坡为(5.83 ± 0.93) $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,斜坡为(6.31 ± 1.43) $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,陡坡为(7.23 ± 1.51) $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,与上述研究结果基本一致,因为坡度增加林分林冠层接受光照的面积,有利于林木吸收和固定CO₂,从而影响林木生长^[19]。兴安落叶松在不同林分密度下其生物量和蓄积量不同,且随林分密度增大,生物量和蓄积量增大^[20]。本研究表明,红桦林在不同密度下其生物量、蓄积量和生产力均不相同,其原因可能是林分密度过大导致林分光照减弱,从而影响单体林木生长,而密度过小虽然光照较强,个体林木生长较好,但林分密度反映了林木株数的多少,因此在控制林龄变量时,林分总生物量、蓄积量和生产力会随林分密度增大而增大,呈显著正相关关系。油松人工林各器官生物量随林分密度变化为,干随林分密度增大而减小,枝、根、叶等器官随林分密度的增大而增大,符合最优分配理论^[21],本研究中林分蓄积量随林分密度增大的相关系数小于生物量,其原因可能是随着林分密度的增大,林木个体间竞争明显,且枝、根、叶等器官生物量随林分密度的增大而增大。林龄对红桦林生物量和蓄积量也有影响,生物量、蓄积量和生产力均随林龄增大而增大,因为随着林分年龄的变化,林分生物量和蓄积量不断积累,逐渐增加,从调查年份开始研究区红桦林从幼龄林进入中林龄,进入生长的速生阶段,因此生产力不断增大,但是随着红桦林逐渐成熟,其生产力必然有所下降。

影响秦岭火地塘林区红桦林生物量和蓄积量变化的因素很多,且各因素间的关系及影响程度亦不相同,为降低因子间共线性的影响,明确各因子之间的影响程度,对影响红桦林生物量和蓄积量的6个因子进行主成分分析,提取的3个主成分对林分生物量和蓄积量的方差累积贡献率为79.95%。在第1主成分中林分密度载荷较高,林分密度通过影响林分光照对生物量和蓄积量产生影响,因此,第1主成分可以认为是林分因子对生物量和蓄积量的影响。第2主成分中坡度、坡向载荷较高,坡度影响林冠层接受光照面积,坡向影响林分接受光照的时间和强度,从而对林分生物量和蓄积量产生影响,第3主成分中海拔载荷较高,海拔对降雨量和气温的影响会间接影响林分生物量和蓄积量。第2、3主成分可认为是环境因子对林分生物量和蓄积量的影响。

林分密度、林龄、坡度、坡向和海拔5个因子共同影响秦岭火地塘林区生物量和蓄积量,其回归模型方程多元相关系数R=0.925,能够较为准确的反映各因子对红桦林生物量和蓄积量的综合影响效应,该方程可作为估算秦岭火地塘林区红桦林生物量和蓄积量的参考模型。

秦岭火地塘林区生物量与其主要影响因子的关系可以用 $B = 0.137fd + 10.627sta - 2.855sla + 0.007g + 0.002e - 307.311$, $V = 0.125fd + 12.308sta - 10.174sla - 0.320g + 0.013e - 369.848$ 回归方程表达,该方程可以用作秦岭火地塘林区生物量和蓄积量的参考模型。因此,在对森林生物量和蓄积量进行估算时,应综合考虑立地因子、林分因子,以保证森林生物量和蓄积量估算的可靠性。

参考文献:

- [1] BROWN S L, SCHROEDER P, KERN J S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA[J]. Forest Ecology and Management, 1999, 123(1): 81-90.
- [2] DEVI N, HAGEDORN F, MOISEEV P, et al. Expanding forests and changing growth forms of Siberian larch at the Polar Urals treeline during the 20th century[J]. Global Change Biology, 2008, 14: 1-11.
- [3] 张凝,冯仲科,冯跃文,等.旺业甸实验林场针叶林蓄积量估测模型的研究[J].中南林业科技大学学报,2013,33(11):83-87.
ZHANG N, FENG Z K, FENG Y W, et al. Research on coniferous forest volume estimation model for Wangyedian Experimental Forest Farm[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(11): 83-87. (in Chinese)
- [4] CHAVE J, RIERA B, DUBOIS M A. Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability[J]. Journal of Tropical Ecology, 2001, 17(1): 79-96.
- [5] 刘贵峰,刘玉平,郭仲军,等.天山云杉林生物量及其变化规律的研究[J].西北林学院学报,2013,28(5):13-17.

- LIU G F, LIU Y P, GUO Z J, et al. Study of biomass of *Picea schrenkiana* var. *tianschnica* and its variation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 13-17. (in Chinese)
- [6] METSARANTA J M, LIEFFERS V J. Using dendrochronology to obtain annual data for modeling stand development: a supplement to permanent sample plots [J]. Forestry, 2009, 82(2): 163-173.
- [7] MYNENI R B, KEELING C D, TUCKER C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. Nature, 1997, 386: 698-702.
- [8] 张远东, 刘彦春, 刘世荣, 等. 基于年轮分析的不同恢复途径下森林乔木层生物量和蓄积量的动态变化 [J]. 植物生态学报, 2012, 36(2): 117-125.
- ZHANG Y D, LIU Y C, LIU S R, et al. Dynamics of stand biomass and volume of the tree layer in forests with different restoration approaches based on tree-ring analysis [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(2): 117-125. (in Chinese)
- [9] 杨凤萍, 胡兆勇, 张硕新. 不同海拔油松和华山松林乔木层生物量与蓄积量的动态变化 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(3): 68-76.
- YANG F P, HU Z Y, ZHANG S X. Dynamic changes in biomass and volume of the layer of *Pinus tabulaeformis* and *Pinus armandi* forests at different altitudes [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(3): 68-76. (in Chinese)
- [10] 郭森鑫, 康冰, 李刚, 等. 小陇山红桦次生林物种组成与立木的点格局分析 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2574-2580.
- GUO Y X, KANG B, LI G, et al. Species composition and point pattern analysis of standing trees in secondary *Betula albo-sinensis* forests in Xiaolongshan of west Qinling Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2574-2580. (in Chinese)
- [11] 雷瑞德, 彭鸿, 陈存根, 等. 火地塘林区桦木林的结构及其稳定性的研究 [J]. 西北林学院学报, 1996, 11(Supp. 1): 71-78.
- [12] 高妍夏, 康冰, 迪玮峙, 等. 秦岭中段红桦次生林更新特征研究 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(1): 163-169.
- GAO Y X, KANG B, DI W Z, et al. Regeneration characteristics of *Betula albo-sinensis* secondary forests in the middle range of Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2013, 41(1): 163-169. (in Chinese)
- [13] 李青超, 张远彬, 王开运, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对亚高山红桦碳水化合物含量与分配的影响 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(1): 1-5.
- LI Q C, ZHANG Y B, WANG K Y, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on carbohydrate contents and allocation in *Betula albo-sinensis* seedlings in sub-alpine forest area [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(1): 1-5. (in Chinese)
- [14] 罗伟样, 刘广全, 李家珏, 等. 西北主要树种培育技术 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 238-245.
- [15] 陈存根, 彭鸿. 秦岭火地塘林区主要森林类型的现存量和生产力 [J]. 西北林学院学报, 1996, 11(Supp. 1): 92-102.
- [16] 刘华, 雷瑞德, 侯琳, 等. 秦岭火地塘林区主要森林类型的碳储量和碳密度 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(3): 133-140.
- LIU H, LEI R D, HOU L, et al. Research on carbon storage and carbon density of main forest types at Houditang forestry region in the Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(3): 133-140. (in Chinese)
- [17] 李晨燕. 立地条件和林分结构对有林地生产力的影响 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(5): 159-160, 184.
- LI C Y. Effects of site conditions stand on productivity of forestry land [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2015, 43(5): 159-160, 184. (in Chinese)
- [18] 毛学刚, 范文义, 李明泽, 等. 黑龙江长白山森林生物量的时空变化分析 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(4): 371-379.
- MAO X G, FAN W Y, LI M Z, et al. Temporal and spatial analysis of forest biomass in Changbai Mountains, Heilongjiang, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(4): 371-379. (in Chinese)
- [19] 沈彪, 党坤良, 武朋辉, 等. 秦岭中段南坡油松林生态系统碳密度研究 [J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1-14.
- SHEN B, DANG K L, WU P H, et al. Organic carbon density in *Pinus tabulaeformis* forest ecosystem on the south slope of the middle Qinling Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1-14. (in Chinese)
- [20] 刘志刚, 马钦彦, 潘向丽, 等. 兴安落叶松天然林生物量及生产力的研究 [J]. 植物生态学报, 1994, 18(4): 328-337.
- [21] 贾全全, 罗春旺, 刘琪璟, 等. 不同林分密度油松人工林生物量分配模式 [J]. 南京林业大学学报, 2015, 39(4): 1-8.
- JIA Q Q, LUO C W, LIU Q J, et al. Biomass allocation in relation to stand density in *Pinus tabuliformis* plantation [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2015, 39(4): 1-8. (in Chinese)