

# 华北落叶松人工林的生物量估算参数\*

罗云建<sup>1,2</sup> 王效科<sup>2</sup> 张小全<sup>3,1</sup> 朱建华<sup>1</sup> 张治军<sup>1</sup> 侯振宏<sup>1</sup>

(1. 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 ;

2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室 北京 100085 ;3. 大自然保护协会中国部 北京 100600 )

**摘 要 :** 分析华北落叶松人工林 4 个典型区域(关帝山、五台山中山区、五台山盆地区和塞罕坝)的生物量估算参数(生物量转扩因子、生物量扩展因子和根茎比)及其区域分异。结果表明:关帝山林区和五台山林区(中山区和盆地区)的生物量转扩因子平均值间无显著差异( $P > 0.05$ )且都大于塞罕坝林区( $P < 0.05$ );关帝山林区、五台山盆地区和塞罕坝林区的生物量扩展因子平均值间无显著差异( $P > 0.05$ )且都小于五台山中山区( $P < 0.05$ );生物量转扩因子和生物量扩展因子随林龄、平均胸径和蓄积量的增加而减小并趋于稳定;4 个区域的根茎比平均值间无显著差异( $P > 0.05$ );根茎比随林龄和平均胸径的增加而增加( $P < 0.01$ ),但与林分密度和蓄积量无显著相关性( $P > 0.05$ )。由于不同区域的生物量转扩因子和生物量扩展因子平均值间存在显著差异,故而建议按区域选择它们的值,并尽可能利用它们与林分测量指标的函数关系来确定。

**关键词 :** 生物量估算;华北落叶松人工林;生物量转扩因子;生物量扩展因子;根茎比

中图分类号:S718.5 文献标识码:A 文章编号:1001-7488(2010)02-0006-06

## Biomass Estimation Factors of *Larix principis-rupprechtii* Plantations in Northern China

Luo Yunjian<sup>1,2</sup> Wang Xiaoke<sup>2</sup> Zhang Xiaoquan<sup>3,1</sup> Zhu Jianhua<sup>1</sup> Zhang Zhijun<sup>1</sup> Hou Zhenhong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of State Forestry Administration Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry Beijing 100091 ;

2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences Beijing 100085 ;

3. The Nature Conservancy China Program Beijing 100600 )

**Abstract :** Biomass conversion and expansion factor (BCEF), biomass expansion factor (BEF) and root:shoot ratio (R/S) of *Larix principis-rupprechtii* plantations in four typical regions (i. e. Guandi Mountain, Middle-alpine zone of Wutai Mountain, Basin zone of Wutai Mountain, and Saihanba Forest Region) were calculated, and then their heterogeneities were analyzed. Results showed that: 1) there was no statistical difference of mean BCEF between Guandi Mountain and Wutai Mountain ( $P > 0.05$ ), but the mean BCEF was greater than that in Saihanba Forest Region ( $P < 0.05$ ). Mean BEF in Middle-alpine zone of Wutai Mountain was greater ( $P < 0.05$ ) than that in the other regions among which there were no significant differences in BEF ( $P > 0.05$ ). BCEF value, as well as BEF, decreased and tended to stabilization with increasing stand age, mean DBH and standing volume. 2) there was no statistical differences of mean R/S among regions ( $P > 0.05$ ). R/S value had positive correlations with stand age and mean DBH ( $P < 0.01$ ), but had no significant correlations with standing volume and stand density. Based on these significant differences among regions, we recommend to select BCEF and BEF values in the given distribution regions. If possible, it is better to use the variable BCEF and BEF as functions of stand measured factors (e. g. stand age, mean DBH, and standing volume).

**Key words :** biomass estimation; *Larix principis-rupprechtii* plantation; biomass conversion and expansion factor; biomass expansion factor; root:shoot ratio

森林固碳量约占陆地植被总固碳量的82.5% (Sabine *et al.*, 2004),森林生物量是评估森林固碳能力和碳收支的重要指标(IPCC, 2003; 2006)。森

林生物量的估算方法主要有生物量相对生长方程、生物量估算参数、3S 技术等(Somogyi *et al.*, 2007)。常用的生物量估算参数包括生物量转扩因子

收稿日期:2008-11-28。

基金项目:科技部科研院所社会公益研究专项(2004DIB3J103);国家科技支撑计划(2007BAC03A07);林业科技支撑计划专题(2006BAD03A0704);国家林业局948项目(2006-4-17)。

\* 张小全为通讯作者。感谢关帝山国有林管理局、五台山国有林管理局和塞罕坝机械林场在野外试验过程中的支持和帮助。

(biomass conversion and expansion factor, BCEF)、木材密度(wood density, WD)、生物量扩展因子(biomass expansion factor, BEF)和根茎比(root:shoot ratio, R/S)(IPCC, 2003; 2006)。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)是我国暖温带亚高山森林类型的主要构成树种,也是华北亚高山地区重要的造林树种(中国森林编辑委员会, 1999)。目前,不同林分起源、立地和经营措施下华北落叶松的生长规律、生物量、生产力、营养元素循环以及碳贮量均有报道(刘志刚等, 1992; 张峰等, 1992a; 1992b; 刘再清等, 1995; 韩有志等, 1997; 柴宝峰等, 1999; 谢会成等, 2002; 吴建国等, 2006; 罗云建等, 2009),但尚未见到生物量估算参数方面的研究。罗云建等(2007)初步分析了中国北方落叶松林的生物量估算参数,但对华北落叶松人工林生物量估算参数及其区域分异的情况仍不清楚。另外,很多研究表明不同树种的生物量估算数值存在很大的差异(Levy *et al.*, 2004; Lehtonen *et al.*, 2004; Teobaldelli *et al.*, 2009)。因此,本研究以华北落叶松人工林为对象,利用大量的生物量实测数据,分析不同区域的生物量估算参数(BCEF, BEF和R/S)值及其变化规律,为区域森林生物量估算提供必要的估算参数。

## 1 研究区概况

华北落叶松人工林集中分布于山西和河北两省,北京、内蒙古、青海等地也有小片分布(中国森林编辑委员会, 1999)。山西省以关帝山、五台山、恒山和管涔山为主分布区(山西森林编辑委员会, 1992),河北省以塞罕坝林区为主分布区(中国森林编辑委员会, 1999; 黄金祥等, 1996)。在全面踏查上述分布区的基础上,选定关帝山、五台山和塞罕坝3个林区作为研究区,其中五台山林区又可分为中山区和盆地区。

关帝山林区位于山西省西部吕梁山脉的中段(111°18′—112°18′E, 37°20′—38°20′N)。全区山体陡峭,沟壑纵横,平均坡度20.8°,平均海拔1927.4 m,最低海拔1000 m。成土母岩以花岗岩、片麻岩、石英岩和角闪岩为主,土壤类型主要有淡褐土、山地淋溶褐土、山地棕壤和亚高山草甸土。年均气温4℃,年降水量600 mm,年日照2800 h,全年无霜期100天。

五台山林区位于山西省东北部太行山山脉(112°48′—113°55′E, 38°27′—39°15′N),可分为中山区和盆地区2个亚区。成土母质以变质岩、石英

岩、白云岩为主,土壤类型主要有褐土、山地褐土、山地淋溶褐土、山地棕壤、亚高山草甸土和高山草甸土。全区位于暖温带湿润半湿润气候区,山顶属于高寒气候,年均气温-4.2℃,极端最低气温-44.8℃,年降水量966.3 mm,全年无霜期72天。

塞罕坝林区位于河北省最北部(116°51′—117°39′E, 42°02′—42°36′N),地跨坝上与接坝山区2个地貌单元。坝上属内蒙古高原东南缘,海拔在1500 m以上,至高点大光顶子海拔1936 m;接坝山区系阴山山脉与大兴安岭余脉的交汇地带,海拔1300~1700 m。坝上以风沙土为主兼有草甸土和沼泽土,接坝山区多为灰色森林土及棕壤,少部分为褐土。主要成土母质为风积物、残积物、堆积物及冲积物等。全区位于干旱半湿润气候区,年气温-1.4℃,极端低温-42.8℃,极端高温30.9℃,年均降水量437.8 mm,年蒸发量1350 mm,全年无霜期约60天。

## 2 研究方法

### 2.1 林木生物量的测定

在全面踏查的基础上,选择具有代表性的地段,相同林龄至少3个重复,设置了20 m×20 m的临时样地共计89块,其中关帝山18块、五台山中山区15块、五台山盆地区24块、塞罕坝林区32块。在整个华北落叶松人工林的调查区域,林下灌木和草本都较为少见,在五台山中山区林下则只有少量草本。各区域样地的基本情况见表1。

在每个样地内进行每木检尺,按径级记录株数,计算平均胸径,并依此平均胸径选取1~3株标准木。将标准木伐倒,地上部分采用分层切割法,根系采用全挖法,测定各器官(带皮树干、树枝、树叶和树根)的鲜质量,同时在标准木各器官的典型部位采集器官样品各200 g带回实验室,在85℃恒温下烘干至恒质量,计算各器官的含水率和干质量。

### 2.2 生物量估算参数的计算

利用生物量估算参数估算森林生物量 $B$ ( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )有2种计算途径:

$$B = V \cdot \text{BCEF} \cdot (1 + \text{R/S}); \quad (1)$$

$$B = V \cdot \text{WD} \cdot \text{BEF} \cdot (1 + \text{R/S}). \quad (2)$$

式中: $V$ 为蓄积量( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ );BCEF为生物量转扩因子,即地上生物量与蓄积量之比( $t \cdot \text{m}^{-3}$ );BEF为生物量扩展因子,即地上生物量与树干生物量之比,无量纲;R/S为根茎比,即地下生物量与地上生物量之比,无量纲;WD为木材密度( $t \cdot \text{m}^{-3}$ )。理论上,BCEF = BEF·WD。

表 1 4 个典型区域华北落叶松人工林的基本情况<sup>①</sup>Tab. 1 Summary of *Larix principis-rupprechtii* plantations in four typical regions

研究区 Study sites	样地数 Plot number	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	林龄 Stand age /a	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	林分密度 Stand density/ (tree·hm <sup>-2</sup> )	管理措施 Management
A	18	1 920 (1 733 ~ 2 130)	31.1 (25.0 ~ 35.0)	20.9 (10.0 ~ 32.0)	11.8 (4.1 ~ 17.2)	10.4 (4.0 ~ 15.6)	2 125 (1 700 ~ 3 350)	粗放管理 Extensive management
B	15	2 226 (2 054 ~ 2 365)	29.5 (20.0 ~ 35.0)	17.3 (8.0 ~ 28.0)	9.1 (4.6 ~ 13.3)	7.3 (3.6 ~ 11.0)	2 627 (1 575 ~ 3 600)	粗放管理 Extensive management
C	24	1 605 (1 400 ~ 1 782)	30.0 (15.0 ~ 60.0)	19.1 (9.0 ~ 30.0)	9.8 (4.0 ~ 17.2)	8.1 (4.0 ~ 12.1)	2 347 (1 100 ~ 3 900)	粗放管理 Extensive management
D	32	1 568 (1 446 ~ 1 790)	15.0 (0.0 ~ 60.0)	25.6 (8.0 ~ 40.0)	13.8 (4.0 ~ 21.5)	11.2 (3.3 ~ 19.6)	1 669 (600 ~ 3 900)	集约管理 Intensive management

①A : 关帝山林区 Guandi Mountain ; B : 五台山中山区 Middle-alpine zone of Wutai Mountain ; C : 五台山盆地区 Basin zone of Wutai Mountain ; D : 塞罕坝林区 Saihanba Forest Region. 下同。The same below.

利用蓄积量、树干生物量、地上生物量和地下生物量的实测值,首先计算每个参数(BCEF, BEF 和 R/S)的值,然后分析它们与林分测量指标(林龄、平均胸径、林分密度和蓄积量)的关系。

### 2.3 数据处理

相关性分析、方差分析和回归分析采用 SPSS 16.0,图形制作采用 SigmaPlot 11.0。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同区域生物量估算参数间的比较

关帝山林区和五台山林区的 BCEF 平均值间无显著差异( $P > 0.05$ ),但都大于塞罕坝林区( $P < 0.05$ );关帝山林区、五台山盆地区和塞罕坝林区的 BEF 平均值间无显著差异( $P > 0.05$ ),但都小于五

台山中山区( $P < 0.05$ );4 个区域的 R/S 平均值间无显著差异( $P > 0.05$ ) (表 2)。故而,合并估算参数值无显著差异的区域后,再分析生物量估算参数的变化规律。合并区域的生物量估算参数值也列在表 2 中。

### 3.2 生物量估算参数与林分测量指标间的关系

BCEF 和 BEF 与林龄、平均胸径和蓄积量呈极显著负相关( $P < 0.01$ ) (表 3)。除塞罕坝林区 BCEF 与林分密度显著正相关( $P < 0.05$ )外,其余区域 BCEF 均与林分密度无显著相关性( $P > 0.05$ ) (表 3)。4 个区域 BEF 均与林分密度无显著相关性( $P > 0.05$ ) (表 3)。R/S 与林龄和平均胸径极显著正相关( $P < 0.01$ ),与林分密度和蓄积量无显著相关性( $P > 0.05$ ) (表 3)。

表 2 4 个典型区域生物量估算参数间的比较<sup>①</sup>

Tab. 2 Comparison of biomass factors among four representative areas

项目 Items	研究区 Study sites	样地数 Plot number	平均值(标准误差) Mean(standard error)	最小值 Minimum	下四分位数 25% quartile	中位数 Median	上四分位数 75% quartile	最大值 Maximum
生物量转扩因子 Biomass conversion and expansion factor/(t·m <sup>-3</sup> )	A	18	0.753 (0.078) a	0.506	0.569	0.654	0.705	1.820
	B	15	0.906 (0.087) a	0.550	0.629	0.805	1.155	1.581
	C	24	0.799 (0.023) a	0.599	0.731	0.786	0.839	1.075
	D	32	0.505 (0.016) b	0.377	0.453	0.474	0.541	0.783
	A + B + C	57	0.813 (0.035)	0.506	0.653	0.734	0.878	1.820
生物量扩展因子 Biomass expansion factor	A	18	1.452 (0.098) a	1.177	1.221	1.303	1.431	2.805
	B	15	1.994 (0.159) b	1.289	1.507	1.707	2.470	3.057
	C	24	1.498 (0.038) a	1.225	1.386	1.472	1.611	1.927
	D	32	1.423 (0.055) a	1.097	1.232	1.341	1.506	2.309
	A + C + D	74	1.454 (0.035)	1.097	1.250	1.356	1.563	2.805
根茎比 Root: shoot ratio	A	18	0.157 (0.009) a	0.076	0.137	0.150	0.167	0.233
	B	15	0.175 (0.013) a	0.069	0.142	0.180	0.208	0.249
	C	24	0.185 (0.009) a	0.096	0.151	0.181	0.217	0.270
	D	32	0.187 (0.008) a	0.120	0.158	0.187	0.206	0.340
	A + B + C + D	89	0.178 (0.005)	0.069	0.145	0.168	0.209	0.340

①各项目同列小写英文字母不同表示在 0.05 水平上差异显著。For an item, mean followed by the same small letter are not statistically different at 0.05 level.

表 3 生物量估算参数与林分调查因子的 Pearson 相关关系<sup>①</sup>

Tab. 3 Pearson's correlation between biomass factors and the stand measured factors

项目 Item	研究区 Study sites	林龄 Stand age/a	平均胸径 Mean DBH/cm	林分密度 Stand density/ ( tree·hm <sup>-2</sup> )	蓄积量 Standing volume/ ( m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
生物量转换因子 ( t·m <sup>-3</sup> ) Biomass conversion and expansion factor	A + B + C D	-0.614 ** -0.666 **	-0.686 ** -0.631 **	-0.191 0.430 *	-0.612 ** -0.614 **
生物量扩展因子 Biomass expansion factor	A + C + D B	-0.655 ** -0.781 **	-0.659 ** -0.860 **	0.184 -0.465	-0.639 ** -0.920 **
根茎比 Root:shoot ratio	A + B + C + D	0.351 **	0.301 **	-0.117	0.168

① \* \* : P < 0.01 ; \* : P < 0.05.

随着林龄、平均胸径和蓄积量的增加 ,BCEF 和 BEF 的值逐渐减小并趋于稳定( 图 1 和 2 )。生物量估算参数(  $y$  )与林分测量指标(  $x$  )( 林龄、平均胸径、蓄积量 )的函数关系采用二项式模型  $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2$ 、倒数模型  $y = a + b/x$ 、幂函数模型  $y = a \cdot x^b$ 、对数模型  $y = a + b \cdot \ln(x)$ 、指数模型 I  $y = a \cdot \exp(b \cdot x)$  和指数模型 II  $y = a + b \cdot \exp(-c \cdot x)$  等常用模型描述 ,其中  $a, b$  和  $c$  为回归系数。回归分析后发现 ,BEF 与林龄的关系用幂函数模型描述较好 ,R/S 与林龄和平均胸径的关系用指数模型 I 描述较好 ,其余用指数模型 II 描述较优( 表 4 )。但是 ,R/S 与林龄和平均胸径的回归效果都很差( 图 3 ,表 4 ) ,不能用于预测根茎比的值。

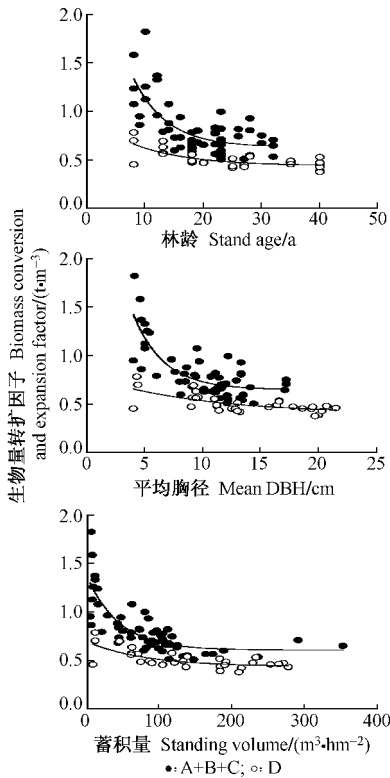


图 1 生物量转换因子与林龄、平均胸径和蓄积量的关系

Fig.1 Relationships between biomass conversion and expansion factor and stand measured variables

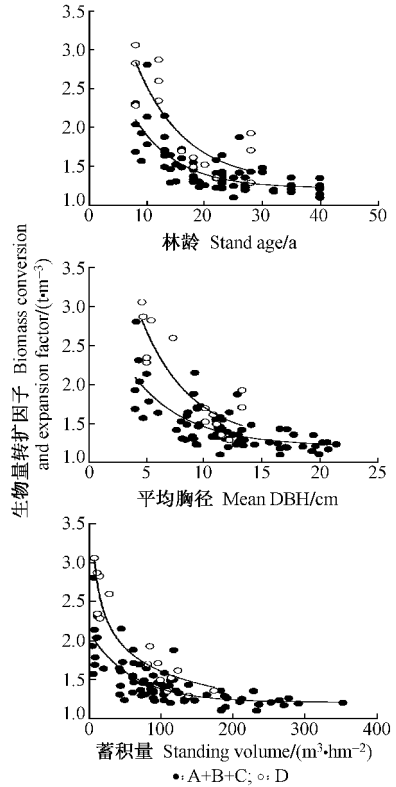


图 2 生物量扩展因子与林龄、平均胸径和蓄积量的关系

Fig.2 Relationships between biomass expansion factor and stand measured variables

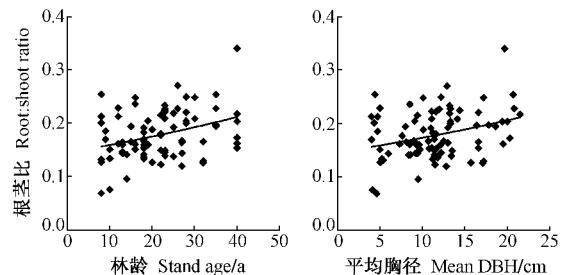


图 3 根茎比与林龄和平均胸径的关系

Fig.3 Relationships between root:shoot ratio and stand measured variables

表4 生物量转扩因子、生物量扩展因子和根茎比与林龄、平均胸径和蓄积量的回归方程

Tab. 4 Regression equations between biomass estimation factors and stand measured variables

因变量 (y) Dependent variable	研究区 Study sites	自变量 (x) Independent variable	回归模型 Regression models	a	S. E.	b	S. E.	c	S. E.	R <sup>2</sup>
生物量转扩因子 Biomass conversion and expansion factor/ (t·m <sup>-3</sup> )	A + B + C	林龄 Stand age/a	$y = a + b \cdot \exp(-c \cdot x)$	0.634	0.062	2.852	1.337	0.175	0.057	0.52
		平均胸径 Mean DBH/cm	$y = a + b \cdot \exp(-c \cdot x)$	0.650	0.050	3.517	1.742	0.378	0.116	0.62
		蓄积量 Standing volume/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	$y = a + b \cdot \exp(-c \cdot x)$	0.604	0.056	0.767	0.075	0.023	0.006	0.65
	D	林龄 Stand age/a	$y = a + b \cdot \exp(-c \cdot x)$	0.439	0.029	0.509	0.198	0.103	0.046	0.52
		平均胸径 Mean DBH/cm	$y = a + b \cdot \exp(-c \cdot x)$	0.398	0.088	0.394	0.090	0.105	0.080	0.40
		蓄积量 Standing volume/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	$y = a + b \cdot \exp(-c \cdot x)$	0.434	0.035	0.257	0.049	0.013	0.006	0.45
生物量扩展因子 Biomass expansion factor	A + C + D	林分密度 Stand density/(tree·hm <sup>-2</sup> )	$y = a \cdot x^b$	0.153	0.066	0.163	0.059	—	—	0.18
		林龄 Stand age/a	$y = a + b \cdot \exp(-c \cdot x)$	1.221	0.058	2.524	0.693	0.132	0.031	0.57
		平均胸径 Mean DBH/cm	$y = a + b \cdot \exp(-c \cdot x)$	1.211	0.074	2.063	0.469	0.212	0.056	0.54
	B	蓄积量 Standing volume/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	$y = a + b \cdot \exp(-c \cdot x)$	1.205	0.059	0.907	0.090	0.017	0.004	0.58
		林龄 Stand age/a	$y = a \cdot x^b$	8.797	2.182	-0.546	0.096	—	—	0.69
		平均胸径 Mean DBH/cm	$y = a + b \cdot \exp(-c \cdot x)$	1.276	0.579	4.584	3.349	0.236	0.222	0.75
根茎比 Root: shoot ratio	A + B + C + D	林龄 Stand age/a	$y = a \cdot \exp(b \cdot x)$	0.145	0.010	0.010	0.003	—	—	0.13
		平均胸径 Mean DBH/cm	$y = a \cdot \exp(b \cdot x)$	0.146	0.011	0.017	0.006	—	—	0.09

#### 4 结论与讨论

不同区域的 BCEF 和 BEF 平均值间存在一定的差异(表 2)。很多学者给出的 BCEF 和 BEF 定义不尽相同(Lehtonen *et al.*, 2004; Levy *et al.*, 2004; IPCC, 2006),因此,横向比较时应特别留意。不同区域 BCEF 和 BEF 的值随林龄、平均胸径和蓄积量等的增加而逐渐减小(表 2,图 1),这与很多研究的结论类似(Brown *et al.*, 1999; Fang *et al.*, 2001; Lehtonen *et al.*, 2004; Levy *et al.*, 2004; IPCC, 2006; 罗云建等 2007; Teobaldelli *et al.*, 2009)。因此,建议按区域选择 BCEF 和 BEF 值,并尽可能用它们与林分测量指标的函数关系来确定。

不同区域 R/S 的平均值无显著差异(表 2),但均小于 IPCC 缺省值(0.337)。R/S 值随着林龄和平均胸径的增加有增加的趋势,而与林分密度和蓄积量无显著相关性(表 2),这与以往研究结论不太一致(Mokany *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2008; 罗云建等, 2007)。Mokany 等(2006)和 Wang 等(2008)都发现 R/S 值随林龄和平均胸径的增加而减小,随

林分密度的增加而增加,Wang 等(2008)还发现 R/S 值随蓄积量的增加而减小;罗云建等(2007)发现我国北方落叶松人工林的 R/S 与林龄、平均胸径和林分密度无显著相关性。造成这种差异的原因很可能与研究尺度的不同、研究区内森林类型的差异、未对原始数据进行分类(如按优势树种分类)等有关。

BCEF 体现了林分生物量和蓄积量间的关系,而 BEF 和 R/S 则体现了器官生物量的分配情况。为适应不同的生长环境,植物采用不同的生态策略,具体表现在生长速率和生物量分配等方面(Westoby, 1998; Westoby *et al.*, 2002)。本研究 4 个研究区域间的差异主要表现在生长环境和管理措施上,其中生长环境的差异主要由海拔引起,五台山中山区的海拔最高,关帝山林区次之,五台山盆地地区和塞罕坝林区最低;在关帝山林区和五台山林区以粗放式管理为主,塞罕坝林区则以集约式管理为主(表 1)。随着海拔的增加,环境梯度基本上呈现从干热到冷湿的变化,导致树木光合作用增强、蒸腾速率增加、植物形态改变和净初级生产力下降。生长在不同海拔的华北落叶松的生物量分配规律存在较

大差异,海拔高的区域树干生物量比例较低,枝叶生物量比例较高。五台山中山区海拔在 2 000 m 以上,已接近华北落叶松分布的海拔上限(王战等,1992),树干生物量的比例明显低于其他区域(罗云建等,2009)。其他 3 个区域的海拔 1 500 ~ 1 900 m,基本处于华北落叶松最适分布的海拔范围,树干生物量的比例基本一致(罗云建等,2009)。故而,五台山中山区的 BEF 明显大于其他 3 个区域。粗放管理措施下不同区域的 BCEF 间无显著差异(表 2)。然而,海拔基本一致的五台山盆地区和塞罕坝林区,不同管理措施下 BCEF 间存在显著差异( $P < 0.05$ ) (表 2)。由于这 2 个区域位于不同的气候区而且土壤种类也有较大的差异,因此,得出管理措施会影响 BCEF 的结论还缺乏直接证据。

### 参 考 文 献

柴宝峰,张金屯,邱 扬,等.1999.晋西北落叶松人工林生物量和生产力的研究.河南科学,17(增刊):68-71.

韩有志,李玉娥,梁胜发,等.1997.华北落叶松人工林林木生物量的研究.山西农业大学学报,17(3):278-283.

黄金祥,李 信,钱进源.1996.塞罕坝植物志.北京:中国科学技术出版社,1-2.

刘再清,陈国海,孟永庆,等.1995.五台山华北落叶松人工林生物生产力与营养元素的积累.林业科学研究,8(1):88-93.

刘志刚,马钦彦.1992.华北落叶松人工林生物量及生产力的研究.北京林业大学学报,14(增刊1):114-122.

罗云建,张小全,侯振宏,等.2007.我国落叶松林生物量碳计量参数的初步研究.植物生态学报,31(6):1111-1118.

罗云建,张小全,王效科,等.2009.华北落叶松人工林生物量及其分配模式.北京林业大学学报,31(1):13-18.

山西森林编辑委员会.1992.山西森林.北京:中国林业出版社.

王 战,张颂云.1992.中国落叶松林.北京:中国林业出版社.

吴建国,张小全,徐德应,等.2006.六盘山林区几种土地利用方式植被活体生物量 C 贮量的研究.林业科学研究,19(3):277-283.

谢会成,杨茂生.2002.华北落叶松人工林营养元素的生物循环.南京林业大学学报:自然科学版,26(5):49-52.

张 峰,上官铁梁.1992a.关帝山华北落叶松林的群落学特征和生物量.山西大学学报:自然科学版,15(1):72-77.

张 峰,上官铁梁.1992b.山西关帝山华北落叶松林的生物量.植物学通报,9(4):51-52.

中国森林编辑委员会.1999.中国森林——针叶林.北京:中国林业

出版社.

Brown S L, Schroeder P E. 1999. Spatial patterns of aboveground production and mortality of woody biomass for eastern U. S. forests. Ecological Applications, 9: 968-980.

Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 291: 2320-2322.

IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. [EB/OL]. [2004-05-01]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.html>.

IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory. [EB/OL]. [2006-12-15]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.

Lehtonen A, Mäkipää R, Heikkinen J, et al. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. Forest Ecology and Management, 188: 211-224.

Levy P E, Hale S E, Nicoll B C. 2004. Biomass expansion factors and root: shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. Forestry, 77(5): 421-430.

Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. 2006. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. Global Change Biology, 12: 84-96.

Sabine C L, Heimann M, Artaxo P, et al. 2004. Current status and past trends of the global carbon cycle// Field C B, Raupach M R, MacKenzie S H. The global carbon cycle: integrating humans, climate and the natural world. Washington: Island Press, 17-44.

Somogyi Z, Cienciala E, Mäkipää R, et al. 2007. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. European Journal of Forest Research, 126: 197-207.

Teobaldelli M, Somogyi Z, Migliavacca M, et al. 2009. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. Forest Ecology and Management, 257: 1004-1013.

Wang X P, Fang J Y, Zhu B. 2008. Forest biomass and root:shoot allocation in northeast China. Forest Ecology and Management, 255: 4007-4020.

Westoby M, Falster D S, Moles A T, et al. 2002. Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. Annual Review of Ecology and Systematics, 33: 125-159.

Westoby M. 1998. A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme. Plant and Soil, 199: 213-227.

(责任编辑 于静娴)