

中国落叶松林胸径-树高相关关系的探讨

刘春云 方文静 蔡琼 马素辉 姜星星 吉成均[†] 方精云

北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京大学城市与环境学院生态学系,北京 100871;

[†] 通信作者, E-mail: jicj@pku.edu.cn

摘要 基于幂函数 $H = aD^b$, 对我国广泛分布的8种落叶松属(*Larix* Mill.)乔木184个样方胸径(D)与树高(H)的相关生长关系进行分析, 并探讨林分密度、林分总胸高断面积、年均温度和年降水量对相关生长系数(b 值)的影响。结果表明, 相关生长系数在不同落叶松属间存在显著差异($P < 0.05$): 东北地区的兴安落叶松林(0.65 ± 0.11)和黄花落叶松林(0.68 ± 0.10)的相关生长系数显著高于西南地区的四川红杉林(0.51 ± 0.17)和红杉林(0.54 ± 0.15) ($F = 2.34, P = 0.026$)。林分密度和总胸高断面积不能解释 b 值的空间变异($P > 0.05$), 但年均温与 b 值显著负相关($R^2 = 0.09, P < 0.001$)。研究结果说明落叶松属的不同种之间胸径-树高关系不同, 且温度可能是导致不同落叶松林分胸径-树高关系存在差异的主要原因。

关键词 胸径-树高; 相关生长; 落叶松

中图分类号 Q948

Allometric Relationship between Tree Height and Diameter of Larch Forests in China

LIU Chunyun, FANG Wenjing, CAI Qiong, MA Suhui, JIANG Xingxing, JI Chengjun[†], FANG Jingyun

Key Laboratory for Earth Surface Process (MOE), Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871; [†] Corresponding author, E-mail: jicj@pku.edu.cn

Abstract 184 plots from larch (*Larix* Mill.) forests across China were sampled to characterize the height-diameter relationships and investigate the effects of structure and climate on them based on the power function $H = aD^b$. The results showed that the height-diameter relationship differed greatly among species: b -value of *Larix gmelinii* (0.65 ± 0.11) and *L. olgensis* (0.68 ± 0.10) were significantly higher than *L. mastersiana* (0.51 ± 0.17) and *L. potaninii* (0.54 ± 0.15) ($F = 2.34, P = 0.026$). These differences were significantly influenced by mean annual temperature, but no statistic relationships were detected between stem density, total basal area and mean annual prepetition against b -value. These results indicated that as mean annual temperature increased, a higher proportion of biomass was allocated into diameter growth than height growth ($R^2 = 0.09, P < 0.001$).

Key words diameter-height; allometric scaling; *Larix*

胸径(diameter at breast height, DBH)和树高(tree height)的变化是树木生长的两个重要方面。前者为径向生长, 主要与树木的机械支持能力、水分吸收能力以及叶生物量有关; 后者为垂直生长, 反映垂直方向上林木截取光照的能力^[1-2]。胸径与树高之间存在密切的相关生长关系(allometry, 又称异

速生长), 反映树木对水平生长和垂直生长的权衡^[1]。目前, 描述生物体器官之间数量关系的相关生长方程多以幂函数形式表示^[3-5]。

由于树木胸径的测定方法简单、准确, 而测定树高相对困难且存在较大误差, 因此, 根据胸径测量数据和胸径-树高的相关生长方程推算树高的方

法得到广泛使用,建立简单而准确的胸径-树高模型尤为重要^[6-9]。

树木胸径和树高的相关生长关系受个体发育和外部环境的双重影响,物种的差异和光照、温度、水分等自然环境的改变都会影响树木的异速生长规律^[2,10-15]。受光环境的显著影响^[15],安徽马尾松和杉木的胸径-树高关系不同。在我国东北地区,温度显著影响树木的胸径-树高关系,随着冬季低温胁迫的增强,更多的生物量资源用于胸径生长,树干更为粗壮^[14]。在新疆地区,水分是针叶树种胸径-树高关系的限制因子,更多的年降水量导致更多的生物量资源分配于树木的垂直生长^[16]。

对同一物种来说,气候是影响树木胸径和树高关系的重要因素。关于胸径-树高关系受哪种环境因子的影响,结论往往会因为研究对象、研究区域的尺度不同而存在差异。在研究的空间尺度和环境梯度较小时,可能会得出胸径-树高生长关系的幂指数与地形、土壤养分、林分密度和林龄等都没有显著关系的结论^[17];当环境梯度较大时,胸径-树高关系会随着气候、立地条件的不同而有规律地变化^[14]。目前关于胸径-树高关系的研究多集中于区域尺度上不同物种、不同发育阶段个体的胸径-树高关系的差异,研究尺度较为狭窄^[2]。由于物种分布的局限性和大尺度调查工作的缺乏,在更大地理尺度上探讨树木相关生长关系的研究较少见,对种以上水平(属)物种胸径-树高关系的环境影响机制的探讨十分不足。

落叶松属(*Larix* Mill.)植物均为落叶乔木,系裸子植物门松科,分布于北半球温带高山、寒温带和寒带地区^[18]。我国有 10 个种和 1 变种,分布范围与我国东亚季风边缘带基本上重合,具有分布广泛的特点^[19]。本文以我国落叶松属乔木为研究对象,通过野外大范围设立样地和每木调查的方法,实际测量落叶松的胸径和树高,研究不同落叶松种的胸径与树高相关关系及其对环境因子的响应。

1 材料和方法

1.1 样方调查

本文选择以 8 种落叶松属乔木为优势树种的 184 个森林样方,于 2000—2004 年和 2013—2015 年分两次进行调查,包括兴安落叶松(*Larix gmelinii*) (54 个样方)、黄花落叶松(*L. olgensis*) (13 个样方)、华北落叶松(*L. principis-rupprechtii*) (45 个样方)、新疆落叶松(*L. sibirica*) (14 个样方)、太白红杉(*L. chinensis*) (22 个样方)、西藏红杉(*L. griffithiana*) (4 个样方)、四川红杉(*L. mastersiana*) (18 个样方)和红杉(*L. potaninii*) (14 个样方)(图 1 和表 1)。除西藏红杉林 4 个样方(800 m²)、华北落叶松林 2 个样方(400 m²)和 1 个样方(1200 m²)外,其余 177 个样方的面积均为 600 m² (20 m× 30 m)。本研究的所有样方中落叶松的株数均为 10 株以上,共调查落叶松个体 8338 株。

方)、新疆落叶松(*L. sibirica*) (14 个样方)、太白红杉(*L. chinensis*) (22 个样方)、西藏红杉(*L. griffithiana*) (4 个样方)、四川红杉(*L. mastersiana*) (18 个样方)和红杉(*L. potaninii*) (14 个样方)(图 1 和表 1)。除西藏红杉林 4 个样方(800 m²)、华北落叶松林 2 个样方(400 m²)和 1 个样方(1200 m²)外,其余 177 个样方的面积均为 600 m² (20 m× 30 m)。本研究的所有样方中落叶松的株数均为 10 株以上,共调查落叶松个体 8338 株。

1.2 数据来源

对样方内所有胸径大于 3 cm 的乔木进行每木调查,即记录树种、测定所有乔木的胸径(1.3 m 树高处)及树高,同时记录调查样方所在位置的经度(°E)、纬度(°N)和海拔高度(m)。计算的林分指标包括林分密度、林分总胸高断面面积以及落叶松乔木的平均胸径、最大胸径、平均树高和最大树高。

气候数据(1950—2000 年)来自 World Clim 数据库(www.worldclim.org/),利用样方的经纬度信息获取所在样点的多年平均温度(mean annual temperature, MAT)和平均降水量(mean annual precipitation, MAP)^[20]。

1.3 数据分析

1.3.1 胸径-树高关系的拟合

对每个落叶松林样方的胸径和树高采用方程(1)或(2)进行拟合^[21-22]。

$$H = aD^b, \quad (1)$$

$$\log H = a + b \log D, \quad (2)$$

其中, H 为树高(m); D 为胸径(cm); a 为方程的截距; b 为斜率,即相关生长系数,表示生物量在胸径和树高中的分配关系^[1,14]。

1.3.2 统计分析

对各样地拟合的胸径-树高方程的参数 a 和 b 进行单因素方差分析,检验其在不同落叶松林间的差异。采用一般线性模型(general linear models, GLM)探讨林分密度、总胸高断面面积、年均温度、年降水量与 b 值的相关关系。应用广义混合线性模型(generalized linear mixed model, GLMM),以林分密度、总胸高断面面积、年均温度为固定因子,以样方及物种作为随机因子,探讨环境因子对 b 值的影响。统计分析使用 SPSS 11.0 (2001, SPSS Inc., USA), Matlab R2015a (The MathWork Inc., Natick, MA, USA)和 R 3.0.3 软件 (<http://www.R-project.org/>)。

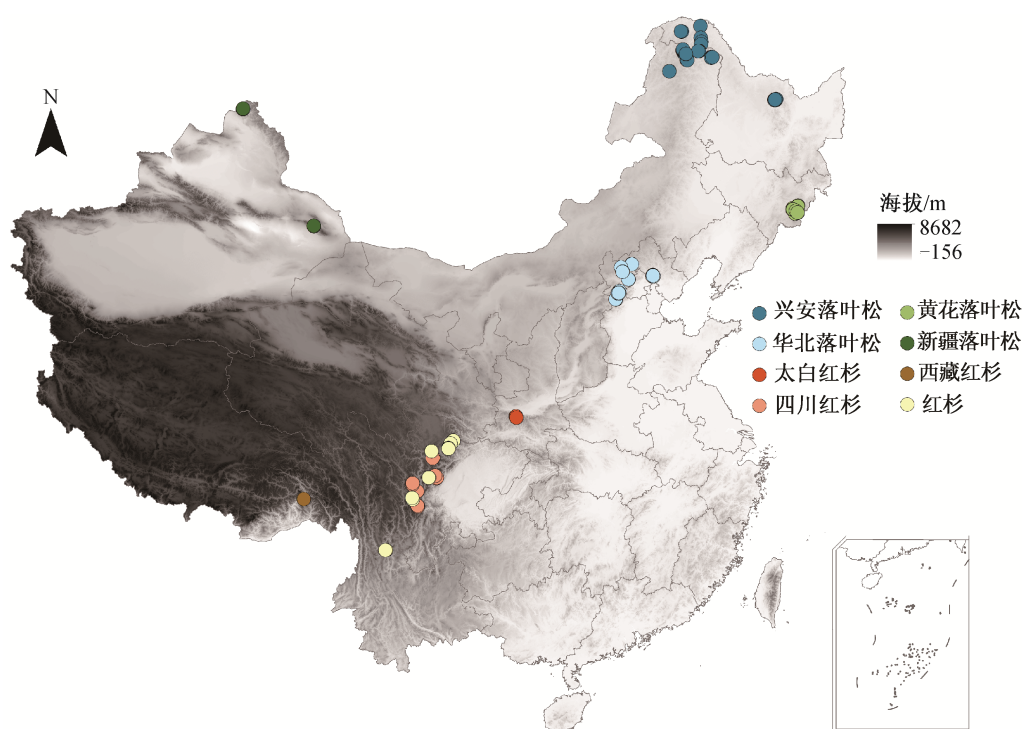


图 1 研究样方位置分布

Fig. 1 Location of study sites

表 1 184 个研究样方的基本信息

Table 1 Location and structural characteristics of the 184 larch forest plots

物种	纬度/(°N)	经度/(°E)	海拔/m	样方数量	林分密度/(株·hm ⁻²)	平均胸径/cm	平均树高/m	总胸高断面面积(m ² ·hm ⁻²)
兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	48.05~52.86	121.51~129.23	279~1114	54	1576.2±727.7	14.2±5.5	13.2±3.6	27.65±7.13
黄花落叶松 <i>L. olgensis</i>	42.06~42.41	127.96~128.43	652~1851	13	1314.1±646.7	19.2±8.0	14.2±5.5	46.16±15.77
华北落叶松 <i>L. principis-rupprechtii</i>	39.61~41.33	114.75~117.51	948~2650	45	1396.5±699.6	17.9±3.8	11.1±2.6	30.90±8.02
新疆落叶松 <i>L. sibirica</i>	43.31~48.68	86.79~93.68	1460~2680	14	1100.0±352.0	22.8±5.0	16.0±4.0	32.56±5.57
太白红杉 <i>L. chinensis</i>	33.92~33.99	107.76~107.79	3100~3300	22	1034.8±478.2	18.7±2.4	8.2±1.1	32.77±16.82
西藏红杉 <i>L. griffithiana</i>	29.29	95.35	3250~3750	4	1212.5±455.2	18.3±12.6	9.1±4.1	20.44±8.71
四川红杉 <i>L. mastersiana</i>	29.38~31.88	101.55~102.98	2730~4002	18	1417.6±755.1	24.6±9.8	12.2±3.9	27.96±16.51
红杉 <i>L. potaninii</i>	27.11~32.77	100.22~103.92	2790~3868	14	1373.8±847.7	25.2±15.2	12.3±3.8	26.80±17.74

说明：林分密度、平均胸径、平均树高和总胸高断面面积的数据为平均值±标准差(SD)。

2 结果

2.1 落叶松林的胸径和树高生长

从表 2 可以看出, 184 个落叶松林调查样方的平均胸径和树高均存在较大差异(表 2)。从平均胸径看, 落叶松林分的平均胸径的范围为 6.3~53.4 cm。平均胸径的极大值出现在云南玉龙雪山的红杉林, 极小值出现在西藏红杉林。红杉林的平均胸径在 8 种落叶松林中最大(25.2±15.2 cm), 其次为四川红杉林(24.5±9.8 cm)和新疆落叶松林(22.7±5.0 cm), 平均胸径最小的是兴安落叶林(14.2±5.5 cm), 其余 4 种落叶松差别不大, 平均值在 17.5~19.5 cm 之间。从最大胸径的平均值看, 黄花落叶松林的最大胸径值最高(59.4±17.2 cm), 西藏红杉林(29.9±20 cm)最低, 其余 6 种落叶松的最大胸径平均值在 32.5~45.0 cm 之间, 从高到低依次为新疆落叶松林、四川红杉林、太白红杉林、红杉林、兴安落叶松林、华北落叶松林。

落叶松林的平均树高分布范围为 5.2~26.7 m。其中, 新疆落叶松林的平均树高均值最高(16.0±4.0 m), 黄花落叶松林(14.2±5.5 m)和兴安落叶松林(13.2±3.6 m)次之, 太白红杉林(8.2±1.1 m)和西藏红

杉林(9.1±4.1 m)最低, 其余树种相差不大。落叶松属乔木的最大树高范围为 8.0~38.0 m。最大树高和平均树高的情况相似, 表现为黄花落叶松林(30.8±6.9 m)最高, 新疆落叶松林(24.4±5.2 m)和兴安落叶松林(24.0±3.9 m)次之, 太白红杉林(13.4±2.4 m)和西藏红杉林(15.3±5.7 m)最低, 其余类型无显著差异。

2.2 落叶松属植物的胸径-树高关系

如图 2 所示, 落叶松属林分的胸径-树高关系均表现为较好的幂函数关系($R^2 > 0.6, P < 0.001$)。总体来说(不区分树种), 所有落叶松林分的胸径-树高函数为 $H = 2.8D^{0.51}$ ($R^2 = 0.21, P < 0.001$)。就不同树种而言, 华北落叶松的斜率(b 值)最高, 为 0.70; 黄花落叶松和新疆落叶松次之, 均为 0.67, 高于西藏红杉(0.49)和红杉(0.52); 太白红杉、四川红杉和兴安落叶松的 b 值无显著差异, 分别为 0.60, 0.61 和 0.61。

由于幂函数模型能够较好地描述不同落叶松林分的胸径-树高关系, 所以使用该模型分别模拟全部调查样方($n = 184$)落叶松胸径与树高的幂函数关系。结果显示, 其中 182 个样方的落叶松胸径-树高均呈显著的幂函数关系。单因素方差分析结果表明, 黄花落叶松(0.68±0.10)和兴安落叶松(0.65±0.11)的 b 值显著高于其余树种, 而华北落叶松、四

表 2 落叶松林调查样方的胸径树高特征
Table 2 DBH and height characteristics of eight larch species in China

森林类型	样方数	平均胸径/cm	最大胸径/cm	平均树高/m	最大树高/m
兴安落叶松林	54	14.2±5.5	38.3±11.7	13.2±3.6	24.0±3.9
		6.5~43.4	15.4~66.8	7.2~26.7	15.8~34.0
黄花落叶松林	13	19.2±8.0	59.4±17.2	14.2±5.5	30.8±6.9
		12.1~37.7	33.1~91.5	6.8~26.4	14.0~38.0
华北落叶松林	45	17.8±3.8	32.5±8.9	11.0±2.6	16.2±3.4
		10.3~26.9	16.9~75.8	5.2~17.5	9.5~25.4
新疆落叶松林	14	22.7±5.0	44.9±11.7	16.0±4.0	24.4±5.2
		12.6~28.9	27.1~68.8	9.9~24.8	17.7~31.7
太白红杉林	22	18.6±2.4	42.4±12.1	8.2±1.1	13.4±2.4
		15.4~24.7	27.9~80.0	6.5~10.8	9.1~18.0
西藏红杉林	4	18.3±12.6	29.9±20.0	9.1±4.1	15.3±5.7
		6.3~33.9	10.8~54.1	5.6~14.4	8.0~22.0
四川红杉林	18	24.5±9.8	43.3±15.7	12.2±3.9	16.9±3.4
		11.5~43.8	22.2~72.6	7.1~19.7	11.8~23.0
红杉林	14	25.2±15.2	42.1±21.7	12.2±3.8	17.9±4.1
		7.9~53.4	23.7~89.8	6.2~21.6	13.2~28.8

说明: 数据为平均值±标准差(SD), 最小值~最大值。

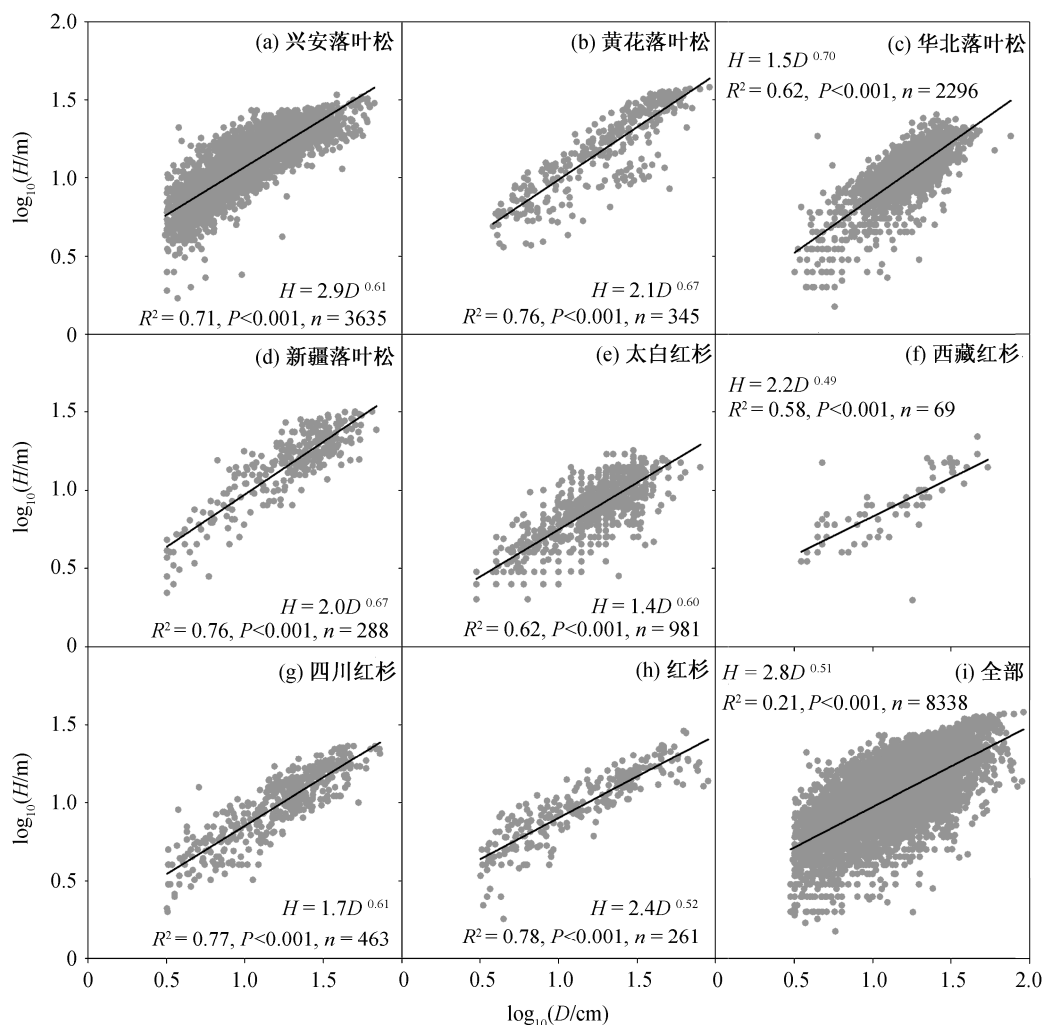


图2 落叶松属植物的胸径-树高关系

Fig. 2 Allometric relationship between diameter and height for larch forests in China

川红杉和红杉的 b 值较低, 分别为 0.56 ± 0.23 、 0.51 ± 0.17 和 0.54 ± 0.15 。其余 3 种落叶松的 b 值无显著差异: 新疆落叶松为 0.61 ± 0.15 、太白红杉为 0.60 ± 0.17 、西藏红杉为 0.64 ± 0.26 ($F=2.34$, $P=0.026$, 见表 3)。

2.3 环境因子对落叶松胸径-树高关系的影响

表 4 给出林分密度、总胸高断面积、年均温度、年降水量与胸径-树高关系的斜率 b 值的线性相关系数。结果显示, b 值与年均温呈显著的负相关关系 ($R^2=0.09$, $P<0.001$), 其余环境因子不能解释落叶松胸径和树高关系的 b 值空间变异 ($P>0.05$) (图 3)。在进行线性混合模型分析之前, 先对各环境因子进行皮尔森(Pearson)相关分析, 结果发现年均温度与年降水量显著相关 ($r=0.51$, $P<0.001$), 与其他因子无显著关系(表 5), 故剔除降水因子, 以

林分密度、林分断面积、年均温度为固定因子, 以物种和样方为随机因子, 建立混合线性模型对 b 值进行拟合。

线性混合模型分析结果显示, 年均温度与胸径-树高关系之间呈显著的负相关关系 ($P<0.001$), 而其他因子对胸径-树高的相关生长无显著影响(表 6)。胸径-树高关系的 b 值与年均温度有显著的负相关关系, 说明在研究区域内, 年均温度越低, b 值越高, 相对更多的生物量用于树高生长, 树木形态趋于细高(如东北地区的兴安落叶松和黄花落叶松)。年均温度越高, b 值越低, 相对更多的生物量用于胸径生长, 树木形态趋于矮壮(比如西南地区的四川红杉和红杉)。在物种水平上, 兴安落叶松和四川红杉的年均温度与 b 值呈显著的负相关关系, 其他 6 种落叶松则关系不显著(图 4)。

表 3 不同落叶松树种胸径-树高关系方程参数的单因素方差分析结果

Table 3 Comparison of the DBH-height-relationship among forests dominated by eight larch species in China

落叶松种类	<i>a</i>	<i>b</i>	样本量
兴安落叶松	2.71(1.24) ^a	0.65(0.11) ^a	54
黄花落叶松	2.26(0.80) ^{ab}	0.68(0.10) ^a	13
华北落叶松	2.96(2.20) ^a	0.56(0.23) ^b	45
新疆落叶松	2.64(1.32) ^{ab}	0.61(0.15) ^{ab}	13
太白红杉	1.59(0.80) ^b	0.60(0.17) ^{ab}	22
西藏红杉	1.64(0.90) ^{ab}	0.64(0.26) ^{ab}	4
四川红杉	2.93(1.88) ^a	0.51(0.17) ^b	18
红杉	2.56(1.42) ^{ab}	0.54(0.15) ^b	13

注: 上角标 a 和 b 表示差异显著性($P < 0.05$), 括号内数字为标准偏差(SD)。

表 4 不同环境因子对落叶松胸径-树高关系 *b* 值的解释

Table 4 Effects of environmental factors on the *b*-value in Equation of $\log H = a + b \log D$ for larch forests in China

环境因子	R^2	<i>P</i>
林分密度	<0.001	0.961
总胸高断面积	<0.001	0.989
年均温度	0.090	<0.001
年降水量	0.006	0.312

3 讨论

前人对我国东北湿润区山地森林的研究表明, 树木的胸径-树高关系受到温度的显著影响, 随着冬季低温胁迫的增强, 更多的生物量资源分配于胸径生长, 树干更为粗壮, 但是没有对落叶松林进行具体分析, 只是指出落叶松林的资源分配-气候关系与其他森林类型不同, 兴安落叶松林尖削度(胸径 DBH 和树高 *H* 的比值)与最冷季均温无显著关系^[14]。本研究的结果也表明, 兴安落叶松的胸径-树高关系与其他森林类型不同, 年均温度会对兴安落叶松的胸径-树高关系产生显著影响, 且年均温越低, 树木形态越趋于细高。Huang 等^[23]对加拿大阿尔伯塔省(49—60°N)主要森林群落的胸径与树高的关系用 $H = aD^b$ 方程拟合, 其中落叶松属植物的 *b* 值约为 0.80, 而本研究中的 *b* 值为 0.54~0.68(表 3)。Huang 等^[23]研究区的纬度和落叶松的 *b* 值均高于本文研究对象, 即研究区更加寒冷, 且树木形态细高, 支持本研究结果。

部分研究表明, 水分显著影响胸径-树高关系, 随着水分条件的改善, 更多的生物量资源分配于树高生长^[10,13]。本文中降水对 *b* 值无影响, 可能是由于研究对象和区域环境的不同。Callaway 等^[10]对比了山地和沙漠的黄松, 两种生境的水分条件差异显著, 在水分胁迫的逆境条件下, 树木需要投入

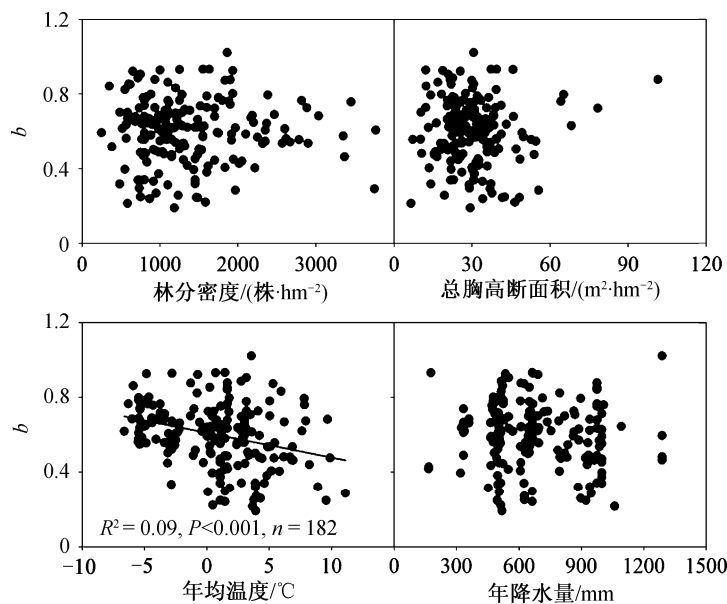


图 3 不同环境因子与斜率 *b* 值的关系

Fig. 3 Relationship between environmental factors and *b*-value for larch forests in China

表 5 各环境因子之间的皮尔森相关系数

Table 5 Pearson correlations among structural measurements and environmental factors for larch forests in China

环境因子	林分密度	总胸高断面积	年均温度	年降水量
林分密度	1.00	0.09	-0.08	-0.13
总胸高断面积	0.09	1.00	0.08	0
年均温度	-0.08	0.08	1.00	0.51***
年降水量	-0.13	0	0.51***	1.00

注: * $0.01 < P < 0.05$; ** $0.001 < P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

表 6 各环境因子线性混合模型分析结果

Table 6 Summary of generalized linear mixed model for effects of environmental factors and structural measurements for larch forests in China

环境因子	估计值	DF	T	P	显著性
截距	0.607782	178	6.52	<0.001	***
林分密度	-0.000006	178	-0.29	0.770	
胸高断面积	0.000347	178	0.35	0.720	
年均温度	-0.013421	178	-3.80	<0.001	***

注: * $0.01 < P < 0.05$; ** $0.001 < P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

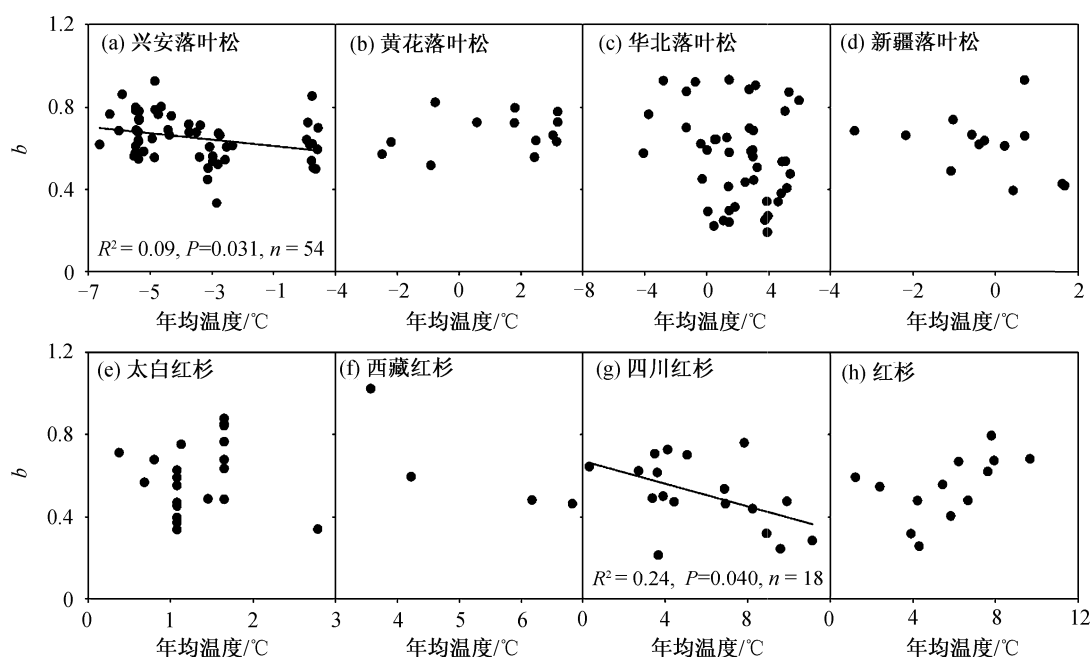
更多资源用于边材生长,以保证水分运输。Martínez 等^[13]的研究地点为荒漠的林灌交错带,水分亦是限制该区域树木生长的重要因子。李利平等^[16]对新疆山地针叶林的研究表明,虽然在整个新疆地区水

分是胸径-树高关系的限制因子,但是北疆地区与南疆地区存在差异,北疆地区水分条件和生产力优于南疆,北疆针叶林的胸径-树高关系受年均温度的影响较大而受年降水量的影响较小,南疆则受年降水量影响较大。本研究中新疆落叶松林正是分布于北疆的阿尔泰山和东天山北坡,落叶松林的水分条件相对良好,对胸径-树高关系的影响不大。

虽然本文研究的是 8 种落叶松,且分布范围涵盖全国,但是落叶松属植物的生态位较为狭窄,主要分布于寒冷湿润的林线附近,且主要为阴坡,生境较为单一,气候梯度较窄,因此本研究中除年均温度外,其他环境因子都没有对胸径-树高关系产生显著影响。

4 结论

本文的研究结果表明: 1) 我国落叶松属不同树种之间,胸径-树高的相关关系并非一致,且我国东北地区的兴安落叶松林和黄花落叶松林的相关生长系数(b 值)显著高于我国西南地区的四川红杉林和红杉林,前者树木形态趋于细高,后者树木形态趋于粗矮; 2) 林分密度和总胸高断面积等生物因子不能解释落叶松不同种之间 b 值的空间变异; 3) 落叶松生长地区年均温度的差异可能是导致不同落叶松种胸径-树高关系存在差异的主要原因。探讨我国

图 4 落叶松不同树种的年均温度与 b 值的相关关系Fig. 4 Relationship between mean annual temperature and b -value for larch forests in China

落叶松属不同种胸径与树高的关系及其对环境因子的响应,有助于理解该物种资源径向和垂直分配的空间分异及驱动机制,亦可为森林经营实践中材积量的估算提供参考。

致谢 北京大学朱剑霄、李鹏、陶胜利、胡小康、姚辉、李超同学在野外调查和数据分析中给予帮助,长白山科学研究院宗占江研究员在物种鉴定方面提供宝贵意见,在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Aiba S I, Kohyama T. Tree species stratification in relation to allometry and demography in a warm-temperate rain forest. *Journal of Ecology*, 1996, 84(2): 207–218
- [2] King D A. Allometry and life history of tropical trees. *Journal of Tropical Ecology*, 1996, 12(1): 25–44
- [3] Peters R H. The ecological implications of body size. Cambridge: Cambridge University Press, 1983: 197–198
- [4] Niklas K J. Size-dependent variations in plant growth rates and the “3/4 power rule”. *American Journal of Botany*, 1994, 81(2): 134–144
- [5] 韩文轩, 方精云. 幂指数异速生长机制模型综述. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 951–960
- [6] Curtis R O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. *Forest Science*, 1967, 13(4): 365–375
- [7] Huang S, Titus S J, Lakusta T W, et al. Ecologically based individual tree height-diameter models for major Alberta tree species. Alberta Environmental Protection, Land and Forest Services, Forest Management Division, 1994: 27–28
- [8] Sharma M, Parton J. Height-diameter equations for boreal tree species in Ontario using a mixed-effects modeling approach. *Forest Ecology and Management*, 2007, 249(3): 187–198
- [9] Azimeh M, Ahto K. Are allometric relationships between tree height and diameter dependent on environmental conditions and management?. *Trees*, 2016: doi 10.1007/s00468-016-1379-4
- [10] Callaway R M, DeLucia E H, Schlesinger W H. Biomass allocation of montane and desert ponderosa pine: an analog for response to climate change. *Ecology*, 1994, 75(5): 1474–1481
- [11] Aiba S I, Kitayama K. Structure, composition and species diversity in an altitude-substrate matrix of rain forest tree communities on Mount Kinabalu, Borneo. *Plant Ecology*, 1999, 140(2): 139–157
- [12] Thornley J H M. Modelling stem height and diameter growth in plants. *Annals of Botany*, 1999, 84(2): 195–205
- [13] Martínez A J, López-Portillo J. Allometry of *Prosopis glandulosa* var. *torreyana* along a topographic gradient in the Chihuahuan desert. *Journal of Vegetation Science*, 2003, 14(1): 111–120
- [14] Wang X P, Fang J Y, Tang Z Y, et al. Climatic control of primary forest structure and DBH-height allometry in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234(1): 264–274
- [15] Cheng X P, Umeki K, Honjo T, et al. Height growth, diameter-height relationships and branching architecture of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* in early regeneration stages in Anhui province, eastern China, effects of light intensity and regeneration mode. *Forestry Studies in China*, 2011, 13(1): 1–12
- [16] 李利平, 安尼瓦尔·买买提, 王襄平. 新疆山地针叶林乔木胸径-树高关系分析. *干旱区研究*, 2011, 28(1): 47–53
- [17] 樊艳文, 王襄平, 曾令兵, 等. 北京栓皮栎林胸径-树高相关生长关系的分析. *北京林业大学学报*, 2011, 33(6): 146–150
- [18] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第 7 卷). 北京: 科学出版社, 1978: 169–196
- [19] 张兰生, 方修琦, 任国玉. 全球变化. 北京: 高等教育出版社, 2004: 88–109
- [20] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 1965–1978
- [21] Stoffels A, Soest J V. The main problems in sample plots. 3. Height regression. *Ned Bosch Tijdschr*, 1953, 25: 190–199
- [22] Stage A R. Prediction of height increment for models of forest growth. USDA Forest Service Research Paper, 1975, INT-164: 20
- [23] Huang S, Titus S J, Wiens D P. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 1992, 22(9): 1297–1304