

冀北山区天然林黑桦材性与生长特性相关性研究

王梦蕾¹, 韩 煜², 唐 爽³, 孟庆星², 孙照斌^{1*}

(1. 河北农业大学 林学院, 河北 保定 071000; 2. 保定市森林病虫害防治检疫站, 河北 保定 071000;
3. 河北能源职业技术学院, 河北 唐山 063004)

摘 要:为探究黑桦生长特征和材性指标之间的关系,以冀北山区阴坡与半阴坡黑桦天然次生林为对象,从生长特性、解剖特性、物理力学特性方面研究其相关特征。结果表明:1)半阴坡黑桦的胸径、树高、材积生长量高于阴坡黑桦,存在显著差异。2)除顺纹抗压强度外,阴坡黑桦其他物理力学性能均优于半阴坡黑桦,且存在显著性差异。3)黑桦生长特性与解剖特性之间相关性较大;生长特性与物理力学特性之间相关性较小,但与基本密度、顺纹抗压强度相关度较高;基本密度与解剖特性和力学特性之间相关性较大。

关键词:黑桦;生长特性;物理力学特性;相关性

中图分类号:S792.151 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0237-07

Correlation Between Wood Properties and Growth Characteristics of Natural *Betula dahurica* in Mountaineous Area of Northern Hebei

WANG Meng-lei¹, HAN Yu², TANG Shuang³, MENG Qing-xing², SUN Zhao-bin^{1*}

(1. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China;
2. Forest Pest Comtronl and Quarantine Station, Baoding 071000, Hebei, China;
3. Hebei Energy College of Vocation and Technology, Tangshan 063004, Hebei, China)

Abstract: *Betula dahurica* is one of the main secondary tree species in the mountainous area of northern Hebei. In order to explore the relationship between its growth characteristics and physical properties, in this paper, the natural secondary forests of *B. dahurica* on the shady slope and half shady slope in the northern mountainous areas of Hebei Province were taken as the research object, the relevant characteristics were studied in terms of growth characteristics, anatomical characteristics, physical and mechanical characteristics. The results showed that 1) the DBH, tree height, and volume growth of the trees on the half shady slope were higher than those growing on the shady slope with significant differences. 2) In addition to the compressive strength along the grain, other physical and mechanical properties of the trees on the half shady slope were superior to those on the shady slope with significant differences. 3) The correlation between growth characteristics and anatomical characteristics was significant. Little correlation was found between growth characteristics and physical and mechanical characteristics, except that the basic density and the compressive strength along the grain were highly correlated. The basic density had a higher correlation with anatomical and physical and mechanical properties.

Key words: *Betula dahurica*; growth characteristics; physical and mechanical property; correlation

林木生长与木材性兼优是用材林定向培育的一个重要目标^[1]。将生长过程与林木特性相结合,以预

收稿日期:2020-06-10 修回日期:2020-10-26
基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFDO60040102)。
作者简介:王梦蕾。研究方向:材性培育与木材利用。E-mail:1577117412@qq.com
* 通信作者:孙照斌,博士,教授。研究方向:木材加工利用。E-mail:sunzb920@163.com

测不同条件下树木特性的变化^[2]。王润辉等^[3]与刘海琳等^[4]研究表明基本密度与生长特性的相关性较弱。蒋赓等^[5]研究表明基本密度与生长特性呈正相关。也有研究表明生长性状与木材密度呈负相关^[6-8]。黄家华^[9]发现材积与基本密度呈现较高的负相关,树高与纤维宽度呈显著正相关,其他生长性状与材性性状之间相关度高低不一。杨建飞等^[10]研究发现生长量与多数解剖特征指标呈正相关。I. Carrillo *et al*^[11]指出了了蓝桉(*Eucalyptus globulus*)解剖特性与化学特性、木材密度密切相关。本研究选取冀北山区天然林黑桦(*Betula dahurica*)进行生长特性、解剖特性和物理力学特性的研究,分析各指标之间的相关性,为黑桦的定向培育提供理论支持,且对黑桦木材加工利用有指导意义。

表 1 标准地概况及样木基本情况

Table 1 Standard profile and basic information of sample woods

| 坡向 | 坡位 | 坡度/(°) | 土壤类型 | 土壤厚度/cm | 郁闭度 | 密度株/hm ² | 胸径/cm | 树高/m | 枝下高/m |
|-----|----|--------|------|---------|-----|---------------------|-------|------|-------|
| 阴坡 | 中 | 14 | 棕壤 | 41 | 0.4 | 875 | 22.3 | 17.7 | 5.7 |
| | 中 | 16 | 棕壤 | 40 | 0.4 | 994 | 22.1 | 18.3 | 4.4 |
| | 中 | 17 | 棕壤 | 41 | 0.5 | 1 011 | 21.9 | 18.8 | 6.0 |
| 半阴坡 | 中 | 16 | 棕壤 | 39 | 0.5 | 1 125 | 22.2 | 16.2 | 4.9 |
| | 中 | 18 | 棕壤 | 41 | 0.6 | 824 | 22.5 | 15.7 | 5.2 |
| | 中 | 19 | 棕壤 | 40 | 0.7 | 1 024 | 22.2 | 16.3 | 4.9 |

1.2 研究方法

1.2.1 生长特性 选定样木后,标定北向,伐倒,并准确测定其根颈位置、实测胸径以及树高。采用两米取段法截取圆盘,并对圆盘的工作面进行刨光处理。量取各个高度圆盘东、西、南、北 4 个方向年轮宽度,计算各调查因子胸径、树高及材积连年生长量、平均生长量。

1.2.2 解剖特性^[12] 包括纤维长度、纤维宽度、纤维长宽比、纤维壁腔比、射线比量、导管比量、纤维比量指标,采用离析法^[13],每个试样测定 30 次。

1.2.3 物理力学特性 参照国家标准 GB/T 1929—2009《木材物理力学试件锯解及试样截取方法》中规定制取试样,各项物理力学指标依据国家标准 GB/T1943~1942—2009《木材物理力学试验方法》进行测定,物理性质测定指标包括基本密度、气干密度、全干密度、湿胀率、干缩率和吸水性;力学性质测试指标主要有木材硬度、抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗压强度。

1.2.4 数据处理 数据处理和方差分析采用 Excel 2010 和 SPSS20.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 黑桦生长特性

2.1.1 胸径生长 由图 1、图 2 可知,阴坡与半阴

1 材料与方法

1.1 试验地与试验材料

1.1.1 试验地概况 试验地位于河北承德隆化县茅荆坝林场小冰榔沟区域(41°29'57"—41°40'36"N, 117°50'46"—118°13'06"E),平均海拔 1 250 m,年平均气温 7.9℃,年降水量 460~580 mm。山体南北坡景观差异明显,北坡较缓,南坡较陡。

1.1.2 试验材料 试验样木于 2016 年 10 月采自茅荆坝林场小冰榔沟。在阴坡、半阴坡桦木天然林立地中各设临时 30 m×30 m 的标准地 6 块,测定基本环境因子,每块标准地依据最大胸径选取 50 a 以上生长良好的黑桦优势木 3 株。标准地概况及样木基本信息见表 1。

坡黑桦连年生长量均在 5~20 a 间呈增长趋势,两者分别在第 20 年和第 15 年时达到最大;20~35 a 总体为下降趋势,其中半阴坡黑桦在 25~30 a 呈小幅上升趋势;35~50 a 均出现波浪式波动变化,50 a 时连年生长量均达到最小值。阴坡与半阴坡黑桦平均生长量均在前 25 年时呈上升趋势,随后呈下降趋势,50 a 时均达最小值。阴坡黑桦胸径的平均生长量和连年生长量在 27 a 时有 1 个交点,半阴坡黑桦有 3 个相交点。

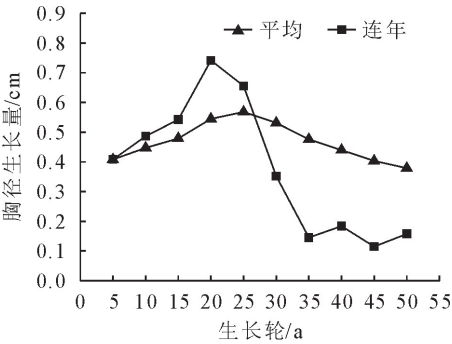


图 1 阴坡黑桦胸径生长量

Fig. 1 DBH annual increment and average growth curves of *Betula dahurica* in shady slope

2.1.2 树高生长 由图 3 和图 4 可知,阴坡与半阴坡的黑桦树高连年生长量总体变化趋势为:5~20 a 间呈上升的趋势,第 20 年时达到最大值,20~25 a

以后迅速下降,30~50 a 间变化较平缓,阴坡 35 a 时达最小值,半阴坡 50 a 时达最小值。树高平均生长量在 5~20 a 间上升,随后下降。20 a 时达到最大,50 a 时达最小值。树高的平均生长量和连年生长量在 22 a 相交。

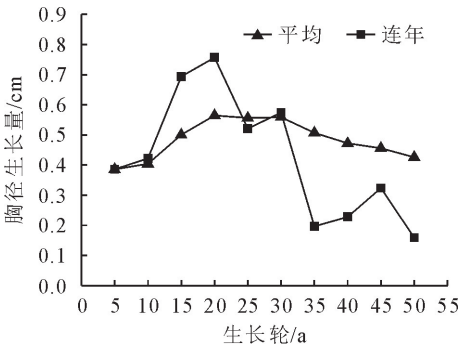


图 2 半阴坡黑桦胸径生长量

Fig. 2 DBH annual increment and average growth curves of *Betula dahurica* in half shady slope

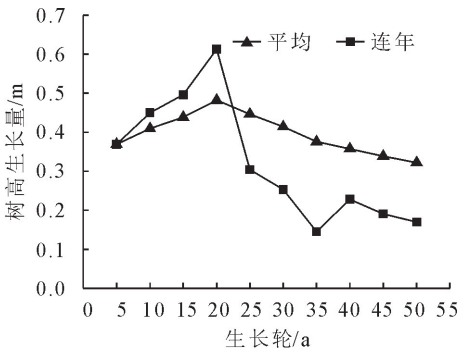


图 3 阴坡黑桦树高生长量

Fig. 3 Height annual increment and average growth curves of *Betula dahurica* in shady slope

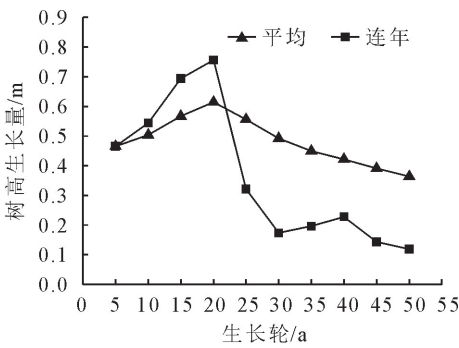


图 4 半阴坡黑桦树高生长量

Fig. 4 Height annual increment and average growth curves of *Betula dahurica* in half shady slope

2.1.3 材积生长 由图 5 和图 6 可知,阴坡黑桦连年生长量在 5~25 a 增长迅速,第 25 年时达到最大值,25~50 a 间呈缓慢变化趋势;半阴坡黑桦连年生长量在 5~15 a 间增长缓慢,随后增长迅速到 30 a,第 35 年时达到最大值,35~50 a 呈下降趋势,阴坡

与半阴坡黑桦 50 a 时均达最小值。平均生长量在 50 a 左右均达到最大。阴坡黑桦连年生长量和平均生长量曲线未相交,说明阴坡上 50 a 生的黑桦未达到数量成熟龄。半阴坡黑桦 49 a 时连年生长量和平均生长量曲线相交,说明半阴坡上黑桦的数量成熟龄确定在 49 a。

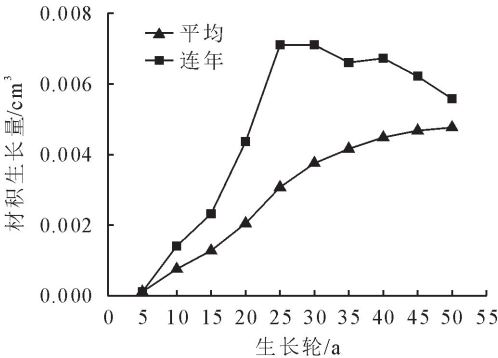


图 5 阴坡黑桦材积生长量

Fig. 5 Volume annual increment and average growth curves of *Betula dahurica* in shady slope

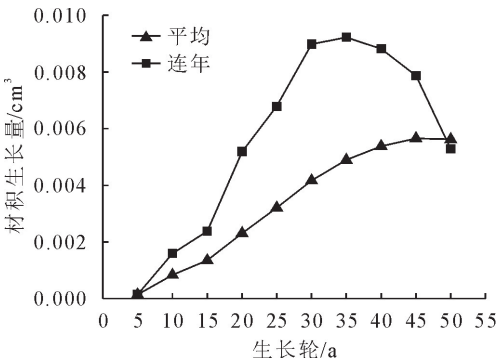


图 6 半阴坡黑桦材积生长量

Fig. 6 Volume annual increment and average growth curves of *Betula dahurica* in half shady slope

2.2 解剖特性

由文献[12]可知,阴坡黑桦纤维长度、宽度、长宽比、壁腔比均值分别为 1 607.86、24.74 μm 和 64.84、0.69,半阴坡黑桦纤维长度、宽度、长宽比、壁腔比均值分别为 1.7282.69、25.91 μm 和 68.75、0.70;不同坡向天然林黑桦木材纤维长度、宽度和长宽比由髓心向树皮方向的径向变异趋势为初始迅速增大,随后趋于稳定;纤维壁腔比自髓心向树皮方向呈波浪式变化,且略有增大的趋势。

阴坡黑桦木射线比量、导管比量、纤维比量均值分别为 16.80%、18.93%、64.27%,半阴坡木射线比量、导管比量、纤维比量均值分别为 15.37%、18.96%、68.72%;由髓心向外,组织比量等指标基本在一条水平线上波动,变异规律性较差。木材 2 种坡向间纤维长度和纤维长宽比差异显著,其他指标差异不显著。

2.3 物理力学特性

2 种坡向间黑桦木材物理力学测量结果与方差分析见表 4。由表 4 可知,阴坡黑桦木材气干密度、全干密度、基本密度均<半阴坡的。方差分析表明,2 种坡向间黑桦木材的气干密度、全干密度差异极显著,基本密度差异显著。阴坡、半阴坡黑桦木材干缩率和吸水湿胀率表现为体积>弦向>径向,全干>气干,均符合木材的干缩稳定性变化规律,其中,阴坡木材<半阴坡的。方差分析表明,2 种坡向间径向、弦向、体积的气干和全干干缩率差异均达 0.05 显著水平以上。按差异干缩分级规定,气干差异干缩处在第“2”级,全干差异干缩处在第“1”级水平。

表 4 2 种坡向间黑桦木材物理力学测量结果与方差分析

Table 4 Testing results of density and variance analyses of the *Betula dahurica* wood samples

| 项目 | | 阴坡 | | | 半阴坡 | | | F | P |
|------------|------|-----------|----------|--------|-----------|----------|--------|---------|----------------------|
| | | 平均值 | 标准差 | 变异系数/% | 平均值 | 标准差 | 变异系数/% | | |
| 气干密度 | | 0.70 | 0.07 | 10.50% | 0.76 | 0.05 | 6.55% | 25.964 | 0.007 ^{***} |
| 全干密度 | | 0.69 | 0.01 | 1.82% | 0.73 | 0.02 | 2.03% | 16.151 | 0.016 [*] |
| 基本密度 | | 0.56 | 0.02 | 2.94% | 0.63 | 0.01 | 2.15% | 19.398 | 0.012 [*] |
| 气干干缩率 | 径向 | 5.42 | 1.18 | 21.82 | 5.83 | 1.34 | 22.93 | 15.032 | 0.018 [*] |
| | 弦向 | 7.11 | 1.01 | 14.27 | 7.28 | 0.85 | 11.71 | 27.748 | 0.006 ^{***} |
| | 体积 | 11.88 | 1.79 | 15.09 | 12.89 | 4.33 | 33.61 | 13.865 | 0.020 [*] |
| 全干干缩率 | 差异干缩 | 1.31 | 0.23 | 7.3 | 1.25 | 0.21 | 5.49 | 13.492 | 0.001 ^{***} |
| | 径向 | 7.82 | 2.19 | 27.97 | 8.44 | 0.90 | 10.65 | 13.578 | 0.021 [*] |
| | 弦向 | 8.27 | 2.68 | 32.39 | 8.99 | 1.21 | 13.5 | 11.229 | 0.029 [*] |
| | 体积 | 16.16 | 5.11 | 31.6 | 16.97 | 1.72 | 10.16 | 37.268 | 0.004 ^{***} |
| 全干到湿材 | 差异干缩 | 1.06 | 0.21 | 5.64 | 1.07 | 0.22 | 3.82 | 15.564 | 0.001 ^{***} |
| | 径向 | 8.97 | 1.72 | 19.12 | 11.48 | 1.14 | 9.95 | 31.444 | 0.005 ^{***} |
| | 弦向 | 11.00 | 1.77 | 16.09 | 12.91 | 0.99 | 7.64 | 16.422 | 0.015 [*] |
| | 体积 | 22.72 | 1.74 | 7.64 | 27.61 | 1.90 | 6.87 | 109.411 | 0.000 ^{***} |
| 全干到气干 | 径向 | 1.35 | 0.41 | 30.1 | 1.56 | 0.54 | 34.7 | 7.809 | 0.049 [*] |
| | 弦向 | 1.41 | 0.38 | 26.9 | 1.65 | 0.38 | 23.37 | 6.78 | 0.010 ^{***} |
| | 体积 | 3.09 | 0.97 | 31.36 | 3.31 | 1.17 | 35.41 | 19.889 | 0.010 ^{***} |
| 顺纹抗压强度 | | 66.23 | 3.76 | 5.68 | 76.85 | 3.49 | 4.54 | 484.507 | 0.000 ^{***} |
| 横纹全部抗压强度 | | 8.00 | 0.66 | 8.24 | 5.98 | 0.86 | 14.34 | 282.452 | 0.000 ^{***} |
| 横纹局部抗压强度强度 | | 11.89 | 2.08 | 17.52 | 10.81 | 1.18 | 10.9 | 26.623 | 0.007 ^{***} |
| 抗弯强度 | | 146.47 | 7.89 | 5.38 | 125.57 | 13.82 | 11 | 111.95 | 0.000 ^{***} |
| 抗弯弹性模量 | | 15 933.53 | 1 838.00 | 11.54 | 12 826.69 | 1 464.01 | 11.41 | 329.673 | 0.012 [*] |

注: ** 表示在 0.01 水平上差异极显著, * 表示在 0.05 水平上差异显著。

2.4 相关性分析

2.4.1 生长特性与解剖特性之间的相关性分析

由表 5 可知,阴坡上,黑桦生长特性与纤维长度、纤维长宽比呈 0.01 水平正相关;胸径、树高与纤维宽度呈 0.01 水平正相关,生长轮、材积与纤维宽度呈 0.05 水平正相关;与纤维壁腔比呈不显著的负相关。生长特性与导管长度呈极显著正相关;与导管宽度、导管长宽比呈正相关,但相关系数不大。生长特性与射线比量呈不显著的正相关,与导管比量呈 0.05 水平正相关,与纤维比量呈负相关。

半阴坡上,黑桦生长特性与纤维长度、纤维宽度

黑桦木材力学特性中的抗弯弹性模量、抗弯强度、横纹抗压强度、顺纹抗压强度均表现为阴坡大于半阴坡。方差分析表明,2 种坡向间黑桦木材顺纹抗压强度、横纹全部抗压强度和局部抗压强度、抗弯强度差异极显著,抗弯弹性模量差异显著。

木材的品质系数指的是木材某一项力学强度与木材的基本密度之间的比值。常用来评价木材作为品质系数指标的是木材顺纹抗压强度和抗弯强度分别与木材基本密度的比值之和^[14]。由表 4 可知,阴坡、半阴坡黑桦木材的强度品质系数分别为 $3\,397.14\times10^5$ 、 $3\,640.44\times10^5$ Pa。黑桦在阴坡、半阴坡上的木材按照等级分类,均属于高品质木材。

呈 0.01 水平正相关;与纤维长宽比呈正相关,但相关度较低,仅树高与纤维长度达 0.05 显著水平;与纤维壁腔比呈不显著的正相关。生长特性与导管长度、导管宽度均达 0.05 以上水平正相关,与导管长宽比未达到显著水平相关。生长特性与射线比量、纤维比量呈不显著的正相关;与导管比量呈负相关,相关度不大。

2.4.2 生长特性与物理力学特性之间的相关性分析 由表 6 可知,黑桦生长特性与气干密度、全干密度呈不显著相关;与基本密度在 0.05 水平呈正相关。生长特性与干缩性能、湿胀性能之间均未达到

表 5 黑桦生长特性与解剖特性之间的相关性

Table 5 Correlation analysis between growth characteristics and physical and mechanical properties of *B. dahurica*

| 项目 | 阴坡 | | | | 半阴坡 | | | |
|-------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 生长轮 | 胸径 | 树高 | 材积 | 生长轮 | 胸径 | 树高 | 材积 |
| 纤维长度 | 0.877** | 0.967** | 0.962** | 0.811** | 0.647* | 0.778** | 0.845** | 0.823** |
| 纤维宽度 | 0.740* | 0.780** | 0.803** | 0.679* | 0.855** | 0.860** | 0.871** | 0.807** |
| 纤维长宽比 | 0.843** | 0.952** | 0.934** | 0.778** | 0.437 | 0.601 | 0.681* | 0.299 |
| 纤维壁腔比 | 0.593 | 0.602 | 0.625 | 0.557 | 0.34 | 0.313 | 0.309 | 0.348 |
| 导管长度 | 0.785** | 0.923** | 0.898** | 0.717* | 0.812** | 0.900** | 0.944** | 0.708* |
| 导管宽度 | 0.734* | 0.814** | 0.823** | 0.651* | 0.920** | 0.959** | 0.973** | 0.864** |
| 导管长宽比 | 0.231 | 0.403 | 0.402 | 0.106 | 0.213 | 0.303 | 0.264 | 0.21 |
| 射线比量 | 0.822** | 0.849** | 0.852** | 0.798** | 0.246 | 0.261 | 0.284 | 0.237 |
| 导管比量 | −0.61 | −0.552 | −0.588 | −0.589 | −0.621 | −0.516 | −0.497 | −0.639* |
| 纤维比量 | −0.725* | −0.786** | −0.772** | −0.706* | 0.606 | 0.602 | 0.623 | 0.598 |

注：* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。 ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。下同。

表 6 黑桦生长特性与物理力学特性之间的相关性

Table 6 Correlation analysis between growth characteristics and physical and mechanical properties of *B. dahurica*

| 项目 | | 阴坡 | | | 半阴坡 | | |
|----------|----|--------|--------|---------|---------|---------|--------|
| | | 胸径 | 树高 | 材积 | 胸径 | 树高 | 材积 |
| 气干密度 | | −0.229 | −0.088 | −0.177 | −0.236 | −0.451 | 0.429 |
| 全干密度 | | 0.058 | 0.194 | 0.267 | −0.325 | 0.306 | −0.283 |
| 基本密度 | | 0.644* | 0.642* | — | 0.982** | 0.984** | — |
| 气干干缩率 | 径向 | −0.243 | −0.386 | −0.402 | 0.004 | −0.572 | 0.334 |
| | 弦向 | 0.092 | −0.298 | −0.294 | −0.488 | −0.491 | 0.508 |
| | 体积 | −0.319 | −0.317 | −0.466 | −0.521 | 0.065 | −0.484 |
| 全干干缩率 | 径向 | 0.488 | −0.429 | −0.346 | 0.595 | 0.581 | 0.375 |
| | 弦向 | 0.542 | −0.455 | −0.505 | −0.431 | −0.551 | −0.527 |
| | 体积 | 0.516 | −0.468 | −0.542 | 0.477 | 0.44 | 0.466 |
| 全干到湿材湿胀率 | 径向 | −0.492 | 0.538 | 0.567 | 0.536 | 0.476 | 0.395 |
| | 弦向 | −0.109 | 0.484 | 0.496 | −0.515 | 0.385 | 0.245 |
| | 体积 | −0.494 | 0.392 | 0.308 | 0.555 | 0.533 | −0.574 |
| 全干到气干湿胀率 | 径向 | −0.427 | 0.375 | 0.415 | −0.575 | −0.267 | −0.559 |
| | 弦向 | 0.659 | −0.376 | −0.407 | 0.059 | 0.523 | −0.409 |
| | 体积 | −0.397 | 0.215 | 0.127 | −0.436 | −0.451 | 0.529 |
| 顺纹抗压强度 | | 0.682* | 0.663* | 0.681* | 0.713* | 0.711* | 0.696* |
| 横纹全部抗压 | | −0.414 | 0.591 | 0.574 | 0.197 | 0.525 | −0.443 |
| 横纹局部抗压 | | 0.713* | 0.526 | 0.541 | −0.555 | −0.591 | −0.542 |
| 抗弯强度 | | −0.505 | −0.579 | −0.618* | 0.515 | 0.514 | −0.413 |
| 抗弯弹性模量 | | 0.559 | 0.473 | 0.483 | −0.547 | −0.559 | −0.544 |

显著相关水平。生长特性与顺纹抗压强度均呈 0.05 水平正相关；与横纹全部抗压、横纹局部抗压强度、抗弯强度、抗弯弹性模量未达到显著相关。

2.4.3 基本密度与解剖特性和力学特性之间的相关性分析 由表 7 可知,阴坡上,黑桦基本密度与导管长度、导管长宽比呈极显著正相关；与纤维长度、纤维宽度、纤维长宽比呈显著正相关。基本密度与导管比量、纤维比量呈负相关,与其他解剖特性指标之间呈不显著的正相关。半阴坡上,黑桦基本密度

与纤维长度、纤维宽度、导管长度、导管宽度呈极显著正相关；与纤维长宽比呈显著相关,。基本密度与导管比量、纤维比量呈负相关,与其他解剖特性指标之间呈不显著的正相关。

由表 8 可知,阴坡上,基本密度与顺纹抗压强度、横纹局部抗压强度、抗弯强度呈极显著正相关；与横纹全部抗压强度、抗弯弹性模量呈显著正相关。半阴坡上,基本密度与顺纹抗压强度、横纹全部抗压强度、横纹局部抗压强度、抗弯弹性模量呈极显著正

表 7 黑桦木材基本密度与解剖特性之间的相关性
Table 7 Correlation analysis between wood basic density and anatomical characteristics of *B. dahurica*

| 项目 | 阴坡 | 半阴坡 |
|-------|---------------------|---------------------|
| 纤维长度 | 0.751 [*] | 0.854 ^{**} |
| 纤维宽度 | 0.735 [*] | 0.838 ^{**} |
| 纤维长宽比 | 0.686 [*] | 0.707 [*] |
| 纤维壁腔比 | 0.335 | 0.303 |
| 导管长度 | 0.773 ^{**} | 0.937 ^{**} |
| 导管宽度 | 0.605 | 0.945 ^{**} |
| 导管长宽比 | 0.804 ^{**} | 0.342 |
| 射线比量 | 0.601 | 0.242 |
| 导管比量 | -0.265 | -0.405 |
| 纤维比量 | -0.616 | -0.551 |

表 8 黑桦木材基本密度与力学特性之间的相关性
Table 8 Correlation between wood basic density and mechanical properties of *B. dahurica*

| 项目 | 阴坡 | 半阴坡 |
|--------|---------------------|---------------------|
| 顺纹抗压强度 | 0.792 ^{**} | 0.811 ^{**} |
| 横纹全部抗压 | 0.667 [*] | 0.743 ^{**} |
| 横纹局部抗压 | 0.897 ^{**} | 0.853 ^{**} |
| 抗弯强度 | 0.765 ^{**} | 0.737 [*] |
| 抗弯弹性模量 | 0.729 [*] | 0.741 ^{**} |

相关;与抗弯强度呈极显著正相关。

3 结论与讨论

3.1 结论

50 a 生阴坡上的黑桦,胸径、树高、材积总生长量为 18.94 cm、16.1 m、0.238 2 m³;半阴坡上的黑桦胸径、树高、材积总生长量为 21.3 cm、18.2 m、0.280 9 m³。阴坡、半阴坡黑桦胸径、树高生长量分别达到显著、极显著水平,材积生长量未达到显著水平。

阴坡上的黑桦木材基本密度为 0.56 g·cm⁻³;全干体积干缩率为 16.16%;湿材到绝干体积湿胀率为 22.72%;用于评价木材的强度品质系数为 3 397.14×10⁵ Pa。半阴坡上的黑桦木材基本密度分别为 0.63 g·cm⁻³;全干体积干缩率为 16.97%;湿材到绝干体积湿胀率为 27.61%;用于评价木材的强度品质系数为 3 640.44×10⁵ Pa。阴坡、半阴坡黑桦木材物理力学特性指标均存在 0.05 水平以上显著。

黑桦生长特性与解剖特性之间相关性较大;除基本密度和顺纹抗压强度外,生长特性与物理力学特性指标之间相关性较小;解剖特性和力学特性与基本密度之间相关性较大。

3.2 讨论

黑桦生长特性与解剖特性的相关性分析中,生

长特性与纤维特性、导管特性的相关系数较高,与组织比量的相关系数较低。生长特性与物理力学相关性分析中,生长特性与基本密度、顺纹抗压强度相关性较高,与其他物理力学特性指标相关性低。2 种坡向之间相关性不一。这是因为生长特性与木材材质材性指标的相关性会受到多种因素的影响,诸如树龄和地理位置等^[15]。这与李荣丽^[16]研究亚美马褂木(*Liriodendron chinense*)、罗浩等^[17]研究四川蓝桉等结论基本一致,但与刘晓春等^[18]研究东北白桦、姜笑梅等^[19]研究 I-214 杨等结果不同。

黑桦冀北密度与解剖特性的相关性分析中,基本密度与纤维特性、导管特性的相关系数较高,与组织比量的相关系数较低。生长特性与物理力学相关性分析中,基本密度与力学特性相关性较高。木材基本密度在不同树龄、不同部位、同种异株、同种不同生长条件等中都会存在差异,是影响木材质量最重要的因素,其微小的变化会导致单位面积上干物质产量发生巨大的变化;而木材密度也不仅仅取决于木材中各个分子组织比量和浸提物含量的多少,与细胞尺寸、胞壁厚度和林木生长速率有关^[20],因此木材基本密度与木材的力学特性和部分微观性质具有密切的关系。

致谢:本研究得到河北省隆化林业局杨志慧高级工程师、河北农业大学林学院牟洪香副教授、张晓燕副教授、邢义虎老师的指导和帮助,以及河北农业大学 2017 届本科毕业生曹亚静、张润华的帮助。

参考文献:

[1] 莫家兴,华慧,翁怀峰,等. 柳杉全同胞家系生长和材性的遗传变异及优良家系选择[J]. 中南林业科技大学学报,2019,39(10):40-47.
MO J X,HUA H,WENG H F,*et al.* Growth and wood property genetic variation analysis and superior family selection of *Cryptomeria* full-sib family[J]. Journal of Central South University of Forestry& Technology,2019,39(10):40-47. (in Chinese)
[2] 敖妍,刘觉非,陈浩,等. 不同种源文冠果 1 年生苗生长节律及性状相关性研究[J]. 西北林学院学报,2019,34(3):91-97.
AO Y,LIU J F,CHEN H,*et al.* Annual growth rhythm and character correlation analysis of 1-Year-old *Xanthcoeras sorbifolium* seedlings from different provenances [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(3): 91-97. (in Chinese)
[3] 王润辉,胡德活,郑会全,等. 杉木无性系生长和材性变异及多性状指数选择[J]. 林业科学,2012,48(3):45-50.
WANG R H,HU D T,DENG H Q,*et al.* Clonal variation in growth and wood quality and the multi-trait index selection of Chinese fir[J]. Scientia Silvae Sinicae,2012,48(3):45-50. (in Chinese)

[4] 刘海琳,国增超,侯静,等. 簸箕柳 F-1 杂交群体木材材性与生长性状相关性分析[J]. 中南林业科技大学学报,2016,36(2): 45-49.
LIU H L, HUO Z C, HOU J, *et al.* Study on wood property and the growth for progeny in a full-sib family of *Salix suchowensis*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(2): 45-49. (in Chinese)

[5] 蒋赅,李志辉,朱积余,等. 红锥家系木材密度等物理性状的遗传及变异性分析[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(11): 9-13, 20.
JIANG Y, LI Z H, ZHU J Y, *et al.* Analysis on genetic and variability of wood density and other physical properties of *Castanopsis hystrix* family[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(11): 9-13, 20. (in Chinese)

[6] LIMA J, ROSADO S S, TRUGILHO P. Assessment of wood density of seven clones of *Eucalyptus grandis* [J]. Southern African Forestry Journal, 2001, 191(1): 21-27.

[7] SKROPPA T, HYLEN G, DIETRICHSON J. Relationships between wood density components and juvenile height growth and growth rhythm traits for norway spruce provenances and families[J]. Silvae Genetica, 1999, 48(5): 235-239.

[8] BEAUDOIN M, HERNANDEZ R E, AHMED K, *et al.* Inter-clonal and within-tree variation in wood density of poplar hybrid clones[J]. Wood and Fiber Science, 1992, 24(2): 147-153.

[9] 黄家华. 马褂木种源生长性状与材性变异研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.

[10] 杨建飞, 宁莉萍, 杨了, 等. 黑壳楠生长量及木材解剖特征的径向变异[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(1): 181-187.
YANG J F, NING L P, YANG L, *et al.* Variation in radial increment of *Lindera megaphylla* and its wood anatomical characteristics[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2018, 42(1): 181-187. (in Chinese)

[11] CARRILLO I, AGUAYO M G, VALENZUELA S, *et al.* Variations in wood anatomy and fiber biometry of *Eucalyptus globulus* genotypes with different wood density[J]. Wood Research, 2015, 60(1): 1-10.

[12] 唐爽, 孙照斌, 马长明, 等. 冀北山区天然林黑桦木材解剖特性的径向变异[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 174-179.
TANG S, SUN Z B, MA C M, *et al.* Radial variations of anatomical properties of natural *Betula davurica* wood in northern Hebei mountainous areas[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(3): 174-179. (in Chinese)

[13] 刘志红, 毋晓洁, 解庆. 槭属 5 树种木材解剖特征比较分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 179-183.
LIU Z H, WU X J, XIE Q. Comparison of wood anatomy of five acer species[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 179-183. (in Chinese)

[14] 韦鹏练, 刘晓玲, 符韵林. 火力楠人工林木材物理力学性质的研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(1): 252-256.
WEI P L, LIU X L, FU Y L. Physical and mechanical properties of *Michelia macclurei* plantation wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 252-256. (in Chinese)

[15] 徐有明, 史玉虎, 徐自学, 等. 日本花柏人工林生长规律与晚材率、木材密度的变异[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(1): 48-51.
XU Y M, SHI Y H, XU Z X, *et al.* Growth regularity of *chamaecyparis pisifera* and variations for latewood percentage and wood basic density[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 34(1): 48-51. (in Chinese)

[16] 李荣丽. 造林密度对亚美马褂木无性系生长及材性效应的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.

[17] 罗浩, 齐锦秋, 谢九龙, 等. 四川蓝桉幼龄材物理力学性质研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(2): 90-96.
LUO H, QI J Q, XIE J L, *et al.* Physical-mechanical properties of *Eucalyptus globulus* juvenile wood from Sichuan[J]. Journal of Northeast A & F University: Nat. Sci. Ed., 2016, 44(2): 90-96. (in Chinese)

[18] 刘晓春, 贾洪柏, 王秋玉. 白桦天然种群木材材质性状的变异与相关性[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(8): 8-10.
LIU X C, JIA H B, WANG Q Y. Genetic variation and correlation in wood properties of *Betula platyphyllai* natural stands[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(8): 8-10. (in Chinese)

[19] 姜笑梅, 殷亚方, 浦上弘幸. 北京地区 I-214 杨树木材解剖特性与基本密度的株内变异及其预测模型[J]. 林业科学, 2003, 39(6): 115-121.
JIANG X M, YIN Y F, FU S H X. Variation within tree of wood anatomical properties and basic density of I-214 poplar in Beijing area and their relationship modelling equations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(6): 115-121. (in Chinese)

[20] ROBISON T L. Specific gravity and fiber length variation in a european black alder (*Alder glutinosa*) provenance study[J]. Wood Fib. Sci., 1987, 19(3): 225-232.