北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

造林密度和混交比例对水曲柳生长形质及空间利用能力的影响

肖伟伟 王龙凤 王树力

Effects of planting density and mixed proportion on growth form quality and spatial utilization ability of *Fraxinus mandshurica*

Xiao Weiwei, Wang Longfeng, Wang Shuli

引用本文:
肖伟伟, 王龙凤, 王树力. 造林密度和混交比例对水曲柳生长形质及空间利用能力的影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(3):60–68. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220172
Xiao Weiwei, Wang Longfeng, Wang Shuli. Effects of planting density and mixed proportion on growth form quality and spatial utilization ability of *Fraxinus mandshurica*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3):60–68. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220172

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220172

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

林分密度对水曲柳人工林碳储量的影响
Effects of stock density on carbon storage in *Fraxinus mandshurica* plantations
北京林业大学学报, 2017, 39(1): 20–26. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160111

水曲柳人工林树木叶片营养元素及其化学计量特征的季节动态
Seasonal variations of leaf nutrient element concentrations and their stoichiometric characteristics in *Fraxinus mandshurica* plantations
北京林业大学学报, 2018, 40(10): 24–33. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180170

长白落叶松水曲柳混交林冠幅预测模型
Crown width prediction models for *Larix olgensis* and *Fraxinus mandshurica* mixed plantations
北京林业大学学报, 2020, 42(7): 23–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190250

不同形态氮素配比对雄性毛白杨苗木生长的影响
Effects of different nitrogen forms and ratios on growth of male *Populus tomentosa* seedlings
北京林业大学学报, 2018, 40(9): 63–71. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180178

密度对米老排萌生幼龄林生长及直径分布的影响
Effects of density on growth and diameter distribution of young coppice stands of *Mytilaria laosensis*
北京林业大学学报, 2018, 40(5): 46–54. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170291

长白落叶松人工林林分碳储量生长模型系研究
Stand carbon stock growth model system for *Larix olgensis* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(11): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210040

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220172

造林密度和混交比例对水曲柳生长形质及空间利用能力的影响

肖伟伟　王龙凤　王树力
（东北林业大学林学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】探究不同造林密度和混交比例下水曲柳生长形质及空间利用能力的变化规律，为培养大径材水曲柳人工林提供理论依据。**【方法】**选择帽儿山林场 1998 年营造的 4 种不同造林密度（分别为 10 000、4 400、2 500 和 2 200 株/hm^2）的水曲柳纯林以及两种不同混交行数比（分别为 1∶1 和 3∶3）、造林密度为 2 500 株/hm^2 的长白落叶松−水曲柳混交林作为研究对象，调查了水曲柳的生长指标、形质指标和空间利用能力指标，运用改进层级分析法获得综合评价值。**【结果】**4 400 株/hm^2、10 000 株/hm^2 纯林中水曲柳生长指标评价值和空间利用能力评价值比 2 500 株/hm^2 纯林分别降低 3.15%、2.58% 和 8.62%、2.58%，2 200 株/hm^2 纯林中水曲柳生长指标评价值、形质指标评价值和空间利用能力指标评价值分别比 2 500 株/hm^2 纯林提高 21.89%、7.41% 和 2.94%。混交行数比 1∶1 和 3∶3 长白落叶松−水曲柳混交林生长指标评价值、形质指标评价值和空间利用能力指标评价值分别比 2 500 株/hm^2 纯林提高 12.18% 、9.05%、17.92% 和 22.98%、12.14%、25.77%。水曲柳综合评价值从大到小为混交行数比 3∶3 长白落叶松−水曲柳混交林、2 200 株/hm^2 纯林、混交行数 1∶1 长白落叶松−水曲柳混交林、2 500 株/hm^2 纯林、4 400 株/hm^2 纯林和 10 000 株/hm^2 纯林。**【结论】**随着造林密度的降低纯林水曲柳个体质量显著提高，混交林能显著提高水曲柳个体质量，建议营造密度为 2 500 株/hm^2 混交行数比为 3∶3 的长白落叶松−水曲柳混交林。

关键词：水曲柳人工林；形质；造林密度；混交比例
中图分类号：S753.51+8　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)03−0060−09
引文格式：肖伟伟，王龙凤，王树力. 造林密度和混交比例对水曲柳生长形质及空间利用能力的影响［J］. 北京林业大学学报，2024，46(3)：60−68. Xiao Weiwei, Wang Longfeng, Wang Shuli. Effects of planting density and mixed proportion on growth form quality and spatial utilization ability of *Fraxinus mandshurica*［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(3): 60−68.

Effects of planting density and mixed proportion on growth form quality and spatial utilization ability of *Fraxinus mandshurica*

Xiao Weiwei　Wang Longfeng　Wang Shuli
(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract:［**Objective**］By exploring the changing principle of growth, form quality and spatial utilization ability under different planting densities and mixed species proportions of *Fraxinus mandshurica* plantations, this paper aims to provide theoretical basis for cultivating big diameter wood of *Fraxinus mandshurica* plantations.［**Method**］Taking pure *Fraxinus mandshurica* plantations with 10 000, 4 400, 2 500 and 2 200 tree/ha planting density, and mixed *Fraxinus mandshurica* plantations of 1 line *Larix*

收稿日期: 2022−05−04　**修回日期:** 2022−06−06
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项（2572020DR04），国家重点研发计划（2017YFD0601103），黑龙江省省级财政林业科研专项（201522）。
第一作者: 肖伟伟。主要研究方向：森林培育与森林经营。Email: xiaoweiwei123a@163.com　地址：150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学林学院。
责任作者: 王树力，教授。主要研究方向：生态学、森林经营、水土保持与荒漠化防治。Email: shuliwang@163.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

olgensis∶1 line *Fraxinus mandshurica* and 3 line *Larix olgensis*∶3 line *Fraxinus mandshurica* with 2 500 tree/ha planting density, which was planted in 1998 from Maoershan Forest Farm of northeastern China as materials, growth index, form quality index and spatial utilization ability index were investigated and comprehensive evaluation value was calculated by improved hierarchical analysis method. [**Result**] The growth index, form quality index and spatial utilization ability index of pure *Fraxinus mandshurica* plantation with 4 400 and 10 000 tree/ha density reduced by 3.15%, 2.58% and 8.62%, 2.58%, respectively than that of pure *Fraxinus mandshurica* plantation with 2 500 tree/ha density, and that of *Fraxinus mandshurica* plantation with 2 200 tree/ha density increased by 21.89%, 7.41% and 2.94%, respectively than that of pure *Fraxinus mandshurica* plantation with 2 500 tree/ha density. The growth index, form quality index and spatial utilization ability index of mixed plantations with 1 line *Larix olgensis*∶1 line *Fraxinus mandshurica* and 3 line *Larix olgensis*∶3 line *Fraxinus mandshurica* increased by 12.18%, 9.05%, 17.92% and 22.98%, 12.14%, 25.77%, respectively than that of pure *Fraxinus mandshurica* plantation with 2 500 tree/ha density. The rank of comprehensive evaluation value of *Fraxinus mandshurica* from big to small was mixed plantation of 3 line *Larix olgensis*∶3 line *Fraxinus mandshurica*, pure plantation with 2 200 tree/ha density, mixed plantation of 1 line *Larix olgensis*∶1 line *Fraxinus mandshurica*, pure plantation with 2 500 tree/ha density, pure plantation with 4 400 tree/ha density and pure plantation with 10 000 tree/ha density. [**Conclusion**] The individual quality of *Fraxinus mandshurica* improves significantly with the decrease of density in pure *Fraxinus mandshurica*, and raised significantly in *Larix olgensis*-*Fraxinus mandshurica* mixed plantation, it should be suggested to plant the mixed plantation of 3 line *Larix olgensis*∶3 line *Fraxinus mandshurica* with 2 500 tree/ha density.

Key words: *Fraxinus mandshurica* plantation; form quality; planting density; mixed proportion

随着经济的发展，人们对大径材的需求日益剧增，培育珍贵树种大径材成为目前森林经营的重要目标[1]。林分结构与林木个体质量关系密切，优化林分结构是森林培育中非常重要的环节，而林分密度和树种组成皆属于林分结构的重要指标[2]。林分密度影响林木个体的生长环境，决定林分是否具备合理的生长空间，反映林木个体营养空间的大小和对所占空间的利用程度[3]。因此，林分密度调控被认为是促进发展高质量人工林的重要措施[4]。与人工纯林相比，针阔混交林可优化林分空间结构，改良土壤理化性质，提高生物多样性，协调种间关系，形成良好的林地小气候，提高林木的生长并改善林木的质量[5−7]。

林木的生长指标和形质指标是衡量林木个体质量的常用指标，而树冠指标所构成的空间利用能力则反映了林木个体对营养空间的占用和利用效率。这 3 个方面的指标决定了人工林用材个体现有价值和生长潜力。这些指标在树木的生长过程中会受到自身生长特性和环境条件的影响。随着人民对森林资源可持续利用认识的加深，提升林木质量作为用材林经营的目标之一，已经日益受到人们的关注和重视[8−9]。诸多学者从林分密度和混交比例方面对林木的生长指标、形质指标和空间利用能力指标进行了大量研究。如刘涛等[10]对杉木（*Cunninghamia lanceolata*）× 观光木（*Tsoongioden odorum*）异龄复层林研究发现，异龄复层林可提高空间和自然资源的利用率，促进树木生长。郑颖等[11]研究发现，不同密度落叶松（*Larix* spp.）林分平均胸径、冠幅和单株材积均呈现随初植密度增大而减小。欧建德等[12]对杉莲混交林的研究表明，乳源木莲（*Manglietia yuyuanensis*）冠高、树冠体积、树冠表面积及生长空间指数均随混交比例减少而逐渐增大。这些研究重点集中在林木生长指标、形质指标和空间利用能力指标等单个指标方面，而对林木个体整体质量的研究相对较少。运用改进的层次分析法，从林木生长指标、形质指标和空间利用能力指标 3 个方面可综合评价林木个体当前质量和生长潜力，更能准确描述林分密度和混交比例对林木个体质量的影响，为大径材的培育提供科学依据。

水曲柳（*Fraxinus mandshurica*）是东北地区珍贵的用材树种之一。过量采伐使天然水曲柳森林资源处于濒危状态[13]。随着人们对优良大径材需求的日益剧增，培育优质水曲柳人工大径材已成为解决木材短缺的重要途径[1]。学者们针对水曲柳生长、形质及空间利用能力开展了深入研究，尤其在林分密度调控[14]、混交[15]和修枝[16]技术等方面进行了大量工作。整体上这些关于水曲柳生长、形质及空间利用能力指标的研究相对零散。本文旨在研究林分密

度和长白落叶松−水曲柳混交比例对水曲柳生长、形质和空间利用能力及其综合评价值的影响，并通过综合评价确定适宜的林分密度及混交比例组合，为水曲柳大径材人工林的培育提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

东北林业大学帽儿山实验林场进德施业区（127°29′～127°44′E，45°14′～45°29′N），属长白山系张广才岭西坡小岭余脉，为松嫩平原向张广才岭过渡的低山丘陵区，地貌类型为低山丘陵，平均海拔300 m，坡度10°。该地区属于温带大陆性季风气候，年均温2.7 ℃，极端高温18.0 ℃，极端低温−12.1 ℃。年均降水量728 mm，集中于6—8月；年蒸发量1 093 mm；年均日照时间2 471 h，无霜期120～124 d，生长季50～70 d。该区土壤类型主要为暗棕壤。植物区系属于长白山植物区系，现有林分类型包括原始植被破坏后形成的天然次生林和栽植的人工林。主要乔木树种包括山杨（*Populus davidiana*）、白桦（*Betula platyphylla*）、水曲柳、黄檗（*Phellodendron amurense*）和胡桃楸（*Juglans mandshurica*）等[17−18]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与调查

2018年10月，在帽儿山林场选择立地条件基本一致（即北向坡中部，坡度约为10°）的区域，以1998年营造的4种不同造林密度（分别为10 000、4 400、2 500和2 200株/hm^2）的水曲柳纯林以及两种不同混交行数比（分别为水落1∶1和3∶3）、造林密度为2 500株/hm^{2}的长白落叶松−水曲柳混交林为研究对象，各林分设置3块20 m × 20 m样地，共18块样地（表1）。

研究对象林分造林时采用50 cm × 50 cm × 30 cm的穴状整地，株高≥20 cm，地径≥0.60 cm Ⅰ级苗木造林。林下表层土壤pH值为5.8～6.2，土壤密度为0.86～1.42 g/cm^3，有机碳含量为41.45～84.19 g/kg，全N含量为3.62～8.09 g/kg，全P含量为0.79～1.37 g/kg，全K含量为4.55～5.52 g/kg。

1.2.2 指标计算

2020年10月初对样地进行每木检尺，调查树高、胸径、冠幅和枝下高。

生长指标包括胸径（D）、树高（H）、单株材积（V）。单株材积（V）计算公式为

$$V = 0.007\,002 - 0.002\,476D + 0.000\,522D^2 + 0.000\,007D^3$$

形质指标包括枝下高、径高比和胸高形数。枝下高表示树干第1个活枝到树干基部的长度。径高比表示树木胸径与树高的比值。胸高形数（$f_{1.3}$）[12]计算公式为

$$f_{1.3} = V/(g_{1.3}H)$$

式中：$g_{1.3}$表示树木胸径位置所对应的胸高断面积。

树木空间利用能力指标[19−20]有：（1）冠幅（W_C）即东西冠幅（$W_{C,ew}$）、南北冠幅（$W_{C,sn}$）的算术平均值；（2）冠长（L_C）即树干第1个活枝基部到树梢的长度；（3）冠形率（R_{CS}）即冠长（L_C）与冠幅（W_C）的比值；（4）树冠表面积（C_{SA}，m^2），$C_{SA} = \pi/4 \times W_C(4L_C^2 + W_C^2)^{1/2}$；（5）树冠体积（$C_V$，m^3），$C_V = \pi/12 \times W_{C,ew}W_{C,sn}L_C$；（6）生长空间指数（$G_{SI}$，m^3/cm），$G_{SI} = C_V/D$。

运用改进层次分析法[21]获得不同造林密度和混交比例水曲柳林木的各指标评价值和林木生长形质及空间利用能力综合评价值。

（1）各评价指标权重的确定。经征询专家意见，确定水曲柳生长性状、形质性状和空间利用能力的权重分别为0.50、0.25和0.25。采用各评价指标数据的样本误差系数，构建判断矩阵，根据矩阵求出最大特征根所对应的特征向量，所求特征向量即为各指标在同类性状中重要性排序。获得各指标特征向量后，由下式得出各指标权重。

表1 帽儿山林场进德施业区不同密度与树种配置水曲柳人工林概况

Tab. 1 Basic situation of *Fraxinus mandshurica* plantation with different densities and tree species configurations in Jinde Region of Maoershan Forest Farm

密度与树种配置 Density and tree species configuration	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	单株材积 Individual plant volume/m^3	公顷蓄积/(m^3·hm^{-2}) Volume per hectare/(m^3·ha^{-1})
Ⅰ	11.10	14.36	0.074 3	141.72
Ⅱ	12.13	14.36	0.090 6	131.75
Ⅲ	12.72	14.30	0.098 0	126.71
Ⅳ	13.54	15.42	0.120 9	110.38
1∶1	13.35	14.36	0.110 8	190.72
3∶3	14.95	14.90	0.141 5	160.24

注：Ⅰ～Ⅳ分别为10 000、4 400、2 500和2 200株/hm^{2}密度水曲柳纯林；1∶1和3∶3分别为2 500株/hm^{2}密度的长白落叶松−水曲柳单行混交林和长白落叶松−水曲柳3行混交林。下同。Notes: Ⅰ−Ⅳ mean the pure *Fraxinus mandshurica* plantation with 10 000, 4 400, 2 500 and 2 200 tree/ha density, *Fraxinus mandshurica-Larix olgensis* 1∶1 and *Fraxinus mandshurica-Larix olgensis* 3∶3 mean the mixed plantation with 1 line *Fraxinus mandshurica*, 1 line *Larix olgensis* and 3 line *Fraxinus mandshurica*, 3 line *Larix olgensis* with 2 500 tree/ha density. The same below.

$$B_i = W_i / W_z \times E_i$$

式中：B_i 为第 i 指标权重，W_i 为第 i 指标对应特征向量，W_z 为同类型性状对应特征向量之和，E_i 为第 i 指标所属性状的权重。

（2）指标均一化。生长指标（胸径、树高和单株材积）、形质指标（枝下高、径高比和胸高形数）及空间利用能力指标（冠幅、冠形率、树冠表面积、树冠体积和生长空间指数）数值越大，林木个体综合品质越优；各指标与林木综合品质呈正向关系。指标均一化公式如下所示。

$$U = 1 - 0.9(X_{max} - X)/(X_{max} - X_{min})$$

式中：U 为个体某个指标效用值；X 为个体某个指标值；X_{max} 为群体某个指标的最大值；X_{min} 为群体某个指标的最小值。

（3）判断矩阵的一致性检验。利用公式 CR = CI/RI 来检验判断矩阵的一致性，其中 CI =（$\lambda_{max}-n$）/（$n-1$），λ_{max} 为最大特征根，n 为矩阵的阶数；RI 为一致性指标参数，取值决定于矩阵的阶数，其中 11 阶矩阵 RI = 1.52；CR 为一致性指标，如果 CR < 0.10，说明该判断矩阵达到了一致性要求。经计算得到 CI 为 0.026，带入公式进一步计算得到 CR 为 0.017 < 0.100，满足判断矩阵的一致性要求。

（4）综合评价值的计算。从均一化公式得到的各个指标在不同处理的均一值，并结合权重，即可获得水曲柳不同林分造林密度及混交比例下水曲柳各性状评价值和林木生长形质及空间利用能力综合评价值。各性状评价值计算公式为性状评价值 = ∑该性状指标均一值 × 对应指标特征向量，林木生长形质及空间利用能力评价值计算公式为综合评价值 = ∑指标均一值 × 对应指标权重。

综合评价值的运用避免了只从生长指标、形质指标或空间利用能力指标等单一指标方向评价森林经营质量的片面性，可全面综合评价森林经营质量的优劣。

1.3　数据处理

运用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 软件进行数据整理和分析。运用 One-way ANOVA 和 Duncan 分析，对各指标进行方差分析和多重比较（$\alpha = 0.05$）。利用 2020 年样地调查数据分析林分密度和混交比例对水曲柳生长指标、形质指标、空间利用能力指标及综合评价值的影响。

2　结果与分析

2.1　造林密度及混交比例对水曲柳生长指标的影响

不同密度与树种配置间胸径和单株材积差异显著（$P < 0.05$）（表 2）。水曲柳胸径从大到小依次为水落 3∶3、密度Ⅳ、水落 1∶1、密度Ⅲ、密度Ⅱ和密度Ⅰ；随着造林密度的减小，纯林中水曲柳的胸径逐渐增大；混交林中水曲柳胸径均大于同密度纯林（密度Ⅲ），水落 3∶3 混交林水曲柳胸径显著高于 4 种密度纯林（$P < 0.05$）。水曲柳树高从大到小依次为密度Ⅳ、水落 3∶3、水落 1∶1、密度Ⅱ、密度Ⅰ和密度Ⅲ；除水落 3∶3 外，密度Ⅳ纯林显著大于其他类型（$P < 0.05$）。水曲柳单株材积从大到小依次为水落 3∶3、密度Ⅳ、水落 1∶1、密度Ⅲ、密度Ⅱ和密度Ⅰ；随着造林密度的减小，纯林中水曲柳单株材积逐渐增大；混交林中水曲柳单株材积均大于同密度纯林（密度Ⅲ），水落 3∶3 混交林水曲柳单株材积显著高于 4 种密度纯林和水落 1∶1 混交林（$P < 0.05$）。

密度Ⅰ纯林和密度Ⅱ纯林中水曲柳胸径、单株材积和生长指标评价值较密度Ⅲ纯林分别降低了 12.01%、24.18%、8.62% 和 4.34%、7.55%、3.15%，树高提高了 0.42%，密度Ⅳ纯林中水曲柳胸径、树高、单株材积和生长指标评价值较密度Ⅲ纯林分别提高了 7.11%、7.83%、23.37% 和 21.89%（表 3）。水落 1∶1 混交林和 3∶3 混交林中水曲柳胸径、树高、单株材积和生长指标评价值较同密度纯林（密度Ⅲ）分别提高了 4.40%、0.42%、13.06%、12.18% 和 16.26%、4.20%、44.39%、22.98%（表 3）。

表 2　不同密度与树种配置水曲柳的生长指标

Tab. 2　Growth index of *Fraxinus mandshurica* with different densities and tree species configurations

密度与树种配置 Density and tree species configuration	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	单株材积 Individual plant volume/m^3	生长指标评价值 Evaluation value of growth index
Ⅰ	12.01 ± 3.49d	14.36 ± 1.75b	0.074 3 ± 0.053 6e	0.067 ± 0.027c
Ⅱ	13.06 ± 3.77c	14.36 ± 2.47b	0.090 6 ± 0.059 7d	0.071 ± 0.023bc
Ⅲ	13.65 ± 3.45bc	14.30 ± 1.80b	0.098 0 ± 0.060 0cd	0.073 ± 0.023bc
Ⅳ	14.62 ± 4.51b	15.42 ± 1.37a	0.120 9 ± 0.079 4b	0.089 ± 0.029a
1∶1	14.25 ± 3.94b	14.36 ± 2.23b	0.110 8 ± 0.078 5bc	0.082 ± 0.032ab
3∶3	15.87 ± 4.16a	14.90 ± 1.78ab	0.141 5 ± 0.082 7a	0.090 ± 0.028a

注：同列不同字母表示差异显著。下同。Notes: different letters in the same column mean significant difference. The same below.

表 3 不同密度与树种配置水曲柳生长指标提高率

Tab. 3 Growth index improvement rate of *Fraxinus mandshurica* with different densities and tree species configurations %

密度与树种配置 Density and tree species configuration	胸径 DBH	树高 Tree height	单株材积 Individual plant volume	生长指标评价值 Evaluation value of growth index
Ⅰ	−12.01	0.42	−24.18	−8.62
Ⅱ	−4.34	0.42	−7.55	−3.15
Ⅳ	7.11	7.83	23.37	21.89
1∶1	4.40	0.42	13.06	12.18
3∶3	16.26	4.20	44.39	22.98

注：相对于2 500株/hm^{2}密度水曲柳纯林（密度Ⅲ）的提高率。同表5、7。Notes: the improvement rate relative to pure Fraxinus mandshurica plantation of 2 500 tree/ha density (density Ⅲ). The same as Tab. 5 and Tab. 7.

2.2 造林密度及混交比例对水曲柳形质指标的影响

不同密度与树种配置间水曲柳形质指标差异显著（$P < 0.05$）（表 4）。水曲柳枝下高从大到小依次为密度Ⅰ、密度Ⅱ、密度Ⅳ、水落 3∶3、水落 1∶1 和密度Ⅲ；随着造林密度的减小，纯林中水曲柳的枝下高逐渐增大（除密度Ⅲ纯林外）；混交林水曲柳枝下高均大于同密度纯林（密度Ⅲ），但低于其他 3 种密度纯林。水曲柳径高比从大到小依次为水落 3∶3、水落 1∶1、密度Ⅳ、密度Ⅲ、密度Ⅱ和密度Ⅰ；随着造林密度的减小，纯林中水曲柳径高比逐渐增大；混交林水曲柳径高比均大于 4 种密度纯林，水落 1∶1 混交林、水落 3∶3 混交林与密度Ⅰ纯林、密度Ⅱ纯林和密度Ⅲ纯林间差异显著（$P < 0.05$）。水曲柳胸高形数从大到小依次为水落 1∶1、水落 3∶3、密度Ⅲ、密度Ⅱ、密度Ⅳ和密度Ⅰ；除密度Ⅳ纯林外，水曲柳纯林胸高形数随着造林密度的减小而逐渐增大；混交林水曲柳胸高形数均大于 4 种密度纯林，水落 1∶1 混交林与密度Ⅰ纯林和密度Ⅳ纯林间胸高形数差异显著（$P < 0.05$）。

密度Ⅰ纯林和密度Ⅱ纯林较密度Ⅲ纯林的水曲柳径高比、胸高形数分别降低了 11.70%、5.71% 和 4.53%、1.00%，枝下高分别提高 17.21% 和 11.09%，而密度Ⅳ纯林较密度Ⅲ纯林水曲柳枝下高、径高比和形质指标评价值分别提高了 8.69%、8.51% 和 7.41%，胸高形数降低 1.90%（表 5）。水落 1∶1 混交林和水落 3∶3 混交林比同密度纯林（密度Ⅲ）枝下高、径高比、胸高形数和形质指标评价值分别提高 3.77%、10.64%、4.52%、9.05% 和 6.07%、12.77%、3.33%、12.14%（表 5）。

2.3 造林密度及混交比例对水曲柳空间利用能力指标的影响

不同密度与树种配置间水曲柳空间利用能力指标差异显著（$P < 0.05$）（表 6）。水曲柳冠幅从大到小依次为水落 3∶3、水落 1∶1、密度Ⅳ、密度Ⅲ、密度Ⅱ和密度Ⅰ；混交林水曲柳冠幅均显著大于 4 种密度纯林（$P < 0.05$）。水曲柳冠形率从大到小依次为密

表 4 不同密度与树种配置水曲柳的形质指标

Tab. 4 Form quality index of *Fraxinus mandshurica* with different densities and tree species configurations

密度与树种配置 Density and tree species configuration	枝下高 Height under branch/m	径高比 Diameter height ratio	胸高形数 Breast height form factor	形质指标评价值 Evaluation value of form quality index
Ⅰ	7.15 ± 1.27a	0.83 ± 0.22d	0.396 ± 0.055c	0.047 ± 0.009d
Ⅱ	6.78 ± 1.48ab	0.90 ± 0.21cd	0.415 ± 0.076abc	0.050 ± 0.009bcd
Ⅲ	6.10 ± 0.99b	0.94 ± 0.17bc	0.420 ± 0.036abc	0.049 ± 0.007cd
Ⅳ	6.63 ± 1.52ab	1.02 ± 0.24ab	0.412 ± 0.045bc	0.052 ± 0.009abc
1∶1	6.33 ± 2.08b	1.04 ± 0.24a	0.439 ± 0.071a	0.053 ± 0.011ab
3∶3	6.47 ± 1.29b	1.06 ± 0.25a	0.434 ± 0.054ab	0.055 ± 0.008a

表 5 不同密度与树种配置水曲柳形质指标的提高率

Tab. 5 Improvement rate of form quality index of *Fraxinus mandshurica* with different densities and tree species configurations %

密度与树种配置 Density and tree species configuration	枝下高 Height under branch	径高比 Diameter height ratio	胸高形数 Breast height form factor	形质指标评价值 Evaluation value of form quality index
Ⅰ	17.21	−11.70	−5.71	−4.32
Ⅱ	11.09	−4.53	−1.00	2.06
Ⅳ	8.69	8.51	−1.90	7.41
1∶1	3.77	10.64	4.52	9.05
3∶3	6.07	12.77	3.33	12.14

表 6　不同密度与树种配置水曲柳的空间利用能力指标

Tab. 6　Spatial utilization ability index of *Fraxinus mandshurica* with different densities and tree species configurations

密度与树种配置 Density and tree species configuration	冠幅 Crown width/m	冠形率 Canopy shape rate	树冠表面积 Crown surface area/m^2	树冠体积 Crown volume/m^3	生长空间指数 Growth spatial index/($m^3 \cdot cm^{-1}$)	空间利用能力指标评价值 Evaluation value of space utilization ability index
Ⅰ	2.32 ± 0.77b	3.49 ± 1.30ab	25.73 ± 18.42c	13.36 ± 12.81b	1.04 ± 0.71b	0.192 ± 0.054c
Ⅱ	2.46 ± 0.79b	3.50 ± 1.92ab	31.15 ± 15.82cd	13.87 ± 10.93b	0.98 ± 0.57b	0.192 ± 0.048c
Ⅲ	2.47 ± 0.79b	3.66 ± 1.60a	33.49 ± 15.57bc	14.58 ± 10.34b	1.02 ± 0.62b	0.198 ± 0.046c
Ⅳ	2.47 ± 0.86b	4.02 ± 1.82a	35.81 ± 18.16b	16.38 ± 13.68b	0.96 ± 0.61b	0.203 ± 0.052bc
1∶1	3.07 ± 1.49a	3.25 ± 1.84ab	40.78 ± 26.15ab	24.79 ± 26.28a	1.48 ± 1.31a	0.233 ± 0.099ab
3∶3	3.31 ± 1.21a	2.82 ± 1.09b	47.37 ± 26.44a	29.39 ± 26.11a	1.67 ± 1.19a	0.248 ± 0.097a

度Ⅳ、密度Ⅲ、密度Ⅱ、密度Ⅰ、水落 1∶1 和水落 3∶3；混交林水曲柳冠形率均小于 4 种密度纯林，水落 3∶3 混交林与密度Ⅲ纯林、密度Ⅳ纯林间差异显著（$P < 0.05$）。水曲柳树冠表面积从大到小依次为水落 3∶3、水落 1∶1、密度Ⅳ、密度Ⅲ、密度Ⅱ和密度Ⅰ；纯林中水曲柳树冠表面积随着造林密度的减小而逐渐增大，密度Ⅳ纯林显著大于密度Ⅰ纯林（$P < 0.05$）；混交林水曲柳树冠表面积均大于 4 种密度纯林，水落 3∶3 混交林与 4 种密度纯林间差异显著（$P < 0.05$）。水曲柳树冠体积从大到小依次为水落 3∶3、水落 1∶1、密度Ⅳ、密度Ⅲ、密度Ⅱ和密度Ⅰ；混交林水曲柳树冠体积均大于 4 种密度纯林，水落 1∶1 混交林、水落 3∶3 混交林与 4 种密度纯林间差异显著（$P < 0.05$）。水曲柳生长空间利用指数从大到小依次为水落 3∶3、水落 1∶1、密度Ⅰ、密度Ⅲ、密度Ⅱ和密度Ⅳ；混交林水曲柳生长空间指数均大于 4 种密度纯林，水落 1∶1、3∶3 混交林与 4 种密度纯林间差异显著（$P < 0.05$）。

密度Ⅰ纯林和密度Ⅱ纯林中水曲柳冠幅、冠形率、树冠表面积、树冠体积和空间利用能力评价值较密度Ⅲ纯林分别降低了 6.07%、4.64%、23.17%、8.37%、2.58% 和0.62%、4.64%、6.99%、4.81%、2.58%。密度Ⅳ纯林中水曲柳冠形率、树冠表面积、树冠体积和空间利用能力评价值较密度Ⅲ纯林分别提高了 9.84%、6.93%、12.35% 和 2.94%，生长空间指数降低了 5.88%。水落 1∶1 混交林中水曲柳冠幅、树冠表面积、树冠体积、生长空间指数和空间利用能力评价值比同密度纯林（密度Ⅲ）分别提高了 24.29%、21.77%、70.03%、45.10% 和 17.92%，冠形率降低了 11.20%，水落 3∶3 混交林冠幅、树冠表面积、树冠体积、生长空间指数和空间利用能力指标评价值较密度Ⅲ纯林分别提高了 34.01%、41.45%、101.58%、63.73% 和 25.77%，冠形率降低了 22.95%（表 7）。

2.4　造林密度及混交比例对水曲柳综合评价值的影响

水曲柳生长指标中，特征向量由大到小的排序为单株材积、胸径和树高。形质指标中，特征向量从大到小的排序为径高比、枝下高和胸高形数。空间利用能力指标中，特征向量从大到小排序为树冠体积、生长空间指数、树冠表面积、冠形率和冠幅（表 8）。

表 7　不同密度与树种配置水曲柳空间利用能力指标的提高率

Tab. 7　Improvement rate of spatial utilization ability of *Fraxinus mandshurica* with different densities and tree species configurations　%

密度与树种配置 Density and tree species configuration	冠幅 Crown width	冠形率 Canopy shape rate	树冠表面积 Crown surface area	树冠体积 Crown volume	生长空间指数 Growth spatial index	空间利用能力指标评价值 Evaluation value of space utilization ability index
Ⅰ	−6.07	−4.64	−23.17	−8.37	1.96	−2.58
Ⅱ	−0.62	−4.34	−6.99	−4.81	−3.85	−2.58
Ⅳ	0.00	9.84	6.93	12.35	−5.88	2.94
1∶1	24.29	−11.20	21.77	70.03	45.10	17.92
3∶3	34.01	−22.95	41.45	101.58	63.73	25.77

表 8　水曲柳定量指标的特征向量及权重

Tab. 8　Characteristic vectors and weights of quantitative indicators of *Fraxinus mandshurica*

指标 Index	生长指标 Growth index			形质指标 Form quality index			空间利用能力指标 Spatial utilization ability index				
	胸径 DBH	树高 Tree height	单株材积生长 Individual plant volume growth	枝下高 Height under branch	径高比 Diameter height ratio	胸高形数 Breast height form factor	冠幅 Crown width	冠形率 Canopy shape rate	树冠表面积 Crown surface area	树冠体积 Crown volume	生长空间指数 Growth spatial index
特征向量 Feature vector	0.060 9	0.017 0	0.135 6	0.033 3	0.043 4	0.026 6	0.075 2	0.109 6	0.129 2	0.186 4	0.182 7
权重 Weight	0.142 6	0.039 8	0.317 6	0.080 6	0.105 0	0.064 4	0.027 5	0.040 1	0.047 3	0.068 2	0.066 9

不同密度与树种配置间水曲柳生长形质及空间利用能力综合评价值差异显著($P < 0.05$)。水曲柳综合评价值从大到小依次为水落 3∶3、密度Ⅳ、水落 1∶1、密度Ⅲ、密度Ⅱ和密度Ⅰ;纯林中水曲柳综合评价值总体随着造林密度的减小而逐渐增大,混交林水曲柳综合评价值均大于同密度纯林(密度Ⅲ),水落 3∶3 混交林与密度Ⅰ、密度Ⅱ和密度Ⅲ之间均差异显著($P < 0.05$)。密度Ⅰ纯林和密度Ⅱ纯林比密度Ⅲ纯林水曲柳综合评价值降低了 6.01% 和 1.44%,密度Ⅳ纯林比密度Ⅲ纯林提高了 13.39%,水落 1∶1 和 3∶3 混交林相对同密度纯林(密度Ⅲ)分别提高了 12.25% 和 20.01%(表 9)。

表 9 不同密度与树种配置下水曲柳生长形质及空间利用能力综合评价值

Tab. 9 Comprehensive evaluation values of growth form quality and spatial utilization ability of *Fraxinus mandshurica* under different densities and tree species configurations

密度与树种配置 Density and tree species configuration	综合评价值 Comprehensive evaluation value	密度与树种配置 Density and tree species configuration	综合评价值提高率 Improvement rate of comprehensive evaluation value/%
Ⅰ	0.339 ± 0.094b	Ⅰ	−6.01
Ⅱ	0.356 ± 0.079b	Ⅱ	−1.44
Ⅲ	0.361 ± 0.077b	Ⅳ	13.39
Ⅳ	0.409 ± 0.095a	1∶1	12.25
1∶1	0.405 ± 0.115a	3∶3	20.01
3∶3	0.433 ± 0.103a		

3 讨 论

3.1 造林密度和混交比例对水曲柳生长指标的影响

合理的混交比例可以使树种间的相互促进作用得到充分发挥,森林的养分、水分、光照和空气等空间资源得到更加有效的配置和优化,能够更好地促进树木的生长,而林分密度是林木生长发育的关键因素[22−23]。本文通过对 6 种不同密度与树种配置水曲柳人工林的研究发现,水曲柳纯林林木胸径、单株材积随造林密度的降低而增大,除长白落叶松−水曲柳 1∶1 混交林胸径、单株材积小于水曲柳密度Ⅵ纯林外,长白落叶松−水曲柳混交林胸径、单株材积均显著大于水曲柳纯林。这与郑颖等[11]对不同密度落叶松幼龄人工林生长,杨嘉麒等[24]对桉树(*Eucalyptus* spp.)−红椎(*Castanopsis hystrix*)人工混交林生长的研究结论一致。随着造林密度的降低,林木个体间竞争减少,个体获得的养分、水分、光照和空气等空间资源增大,促进了林木的生长[25]。长白落叶松−水曲柳混交作为优异的树种混交配置,合理的混交比例更有利于发挥长白落叶松−水曲柳间的相互促进作用,改善林地环境,提高土壤养分含量[26−27]。而树高受林分密度、混交比例密度与树种配置影响较小且没有明显规律,这与前人的研究结果一致[11,28]。从生长指标角度考虑,为培育水曲柳大径材,可选择营造水曲柳密度Ⅵ纯林和长白落叶松−水曲柳 3∶3 混交林。

3.2 造林密度和混交比例对水曲柳形质指标的影响

林分密度和混交比例作为林分结构的重要组成部分,对林木形质具有显著影响。韩飞等[29]研究发现不同林分密度条件间落叶松干形有着明显差异,密度 > 800 株/hm^2 干形最优,而密度 < 400 株/hm^2 干形最差。唐继新等[5]通过对西南桦与红椎同龄混交林的研究发现,混交林有利于提高西南桦(*Betula alnoides*)与红椎的优良树干形质和林木生活力,而在欧建德等[12]对不同混交比例杉莲混交林的研究中,乳源木莲尖削度、枝下高出现随其混交比例减少而逐渐减少的变化。本研究发现,除密度Ⅲ纯林外,水曲柳枝下高均随林分密度减小而减小,长白落叶松−水曲柳混交林均低于水曲柳纯林;胸高形数、径高比基本随着林分密度的减小而增大,长白落叶松−水曲柳混交林胸高形数均大于水曲柳纯林。这与前人林分密度、混交比例对形质的研究结果一致[30−31]。随着林分密度的增大,林木个体间竞争压力增大,林木树冠重叠程度增大,下层树冠获得的光照、养分逐渐减小,加剧了自然整枝[32]。而长白落叶松−水曲柳混交林中水曲柳种内竞争相对较小,下层树冠受光量、养分供给较多,使得自然整枝程度较小。提高林分密度利于提高枝下高,而降低林分密度或进行混交利于提高林木圆满度。为培育树干圆满通直的水曲柳人工林,可采用长白落叶松−水曲柳 3∶3 混交。

3.3 造林密度和混交比例对水曲柳空间利用能力指标及综合评价值的影响

树冠的大小和形态受着林分密度和混交比例的影响,林分密度和混交比例可影响林木的个体营养空间,进而导致树冠大小和形态发生改变,使林木空间利用能力发生改变。本文研究发现,除个别数据外,林分密度对纯林冠幅、冠形率、树冠表面积、树冠体积和生长空间指数等空间利用能力指标没有显

著影响，而长白落叶松−水曲柳混交林冠幅、树冠表面积、树冠体积和生长空间指数等空间利用能力指标均显著大于水曲柳纯林。其冠幅、冠形率、树冠表面积和树冠体积呈现随林分密度的减小而增大的趋势，除混交林冠形率小于水曲柳纯林外，长白落叶松−水曲柳混交林空间利用能力指标均大于水曲柳纯林。这与前人的研究结果一致[12]。这可能是由于林分密度减小后，个体所占营养空间增大，树冠生长空间增大，使得林木空间利用能力增强[33]。而长白山落叶松和水曲柳空间利用能力的变化，是因为长白山落叶松和水曲柳生态位互补，形成了差异性林分结构，以及由此形成差异性的生境与林木竞争共同作用的结果。可见，长白落叶松−水曲柳混交林林木空间利用能力优于水曲柳纯林，而林分密度对水曲柳空间利用能力并没有显著影响。

4　结　　论

水曲柳纯林中林木生长形质和空间利用能力的综合评价值呈现随林分密度的减小而逐渐增大的趋势，以 2 200 株/hm^2 林分中林木的综合品质最优。长白落叶松−水曲柳混交林中水曲柳林木生长形质和空间利用能力的综合评价值显著高于水曲柳纯林，以行数混交比为 3∶3 的长白落叶松−水曲柳混交林中水曲柳林木综合品质最优。为培育速生、优质、通直的大径材水曲柳，建议营造混交行数比为 3∶3，造林密度为 2 500 株/hm^2 的长白落叶松−水曲柳混交林或以长白落叶松−水曲柳 3∶3 混交林模式为目标优化现有林分结构，达到加快生长，提高形质，增大林木生长空间的目的。

参　考　文　献

[1] 关追追, 张彦东. 水曲柳节子时空分布特征与变色规律研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 53−60.
Guan Z Z, Zhang Y D. Spatial and temporal distribution characteristics and discoloration law of *Fraxinus mandshurica* knot[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(8): 53−60.

[2] Christinal S, Valerie M L. Introduction and evaluation of possible indices of stand structural diversity[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31(7): 1105−1115.

[3] Canham C D, Lepage P T, Coates K D. A neighborhood analysis of canopy tree competition: effects of shading versus crowding[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(4): 778−787.

[4] Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, et al. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration[J]. Geoderma, 2006, 137(3−4): 253−268.

[5] 唐继新, 朱雪萍, 贾宏炎, 等. 西南桦红椎混交林的生长动态及林木形质分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2022, 46(1): 97−105.
Tang J X, Zhu X P, Jia H Y, et al. Growth dynamics and tree form quality of mixed *Betula alnoides-Castanopsis hystrix* plantation[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(1): 97−105.

[6] Forrester D I, Pares A, O'hara C, et al. Soil organic carbon is increased in mixed-species plantations of *Eucalyptus* and nitrogen-fixing acacia[J]. Ecosystems, 2013, 16(1): 123−132.

[7] Bauhus J, van Winden A P, Nicotra A B. Aboveground interactions and productivity in mixed-species plantations of *Acacia mearnsii* and *Eucalyptus globulus*[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(3): 686−694.

[8] 欧建德, 吴志庄, 罗宁. 林窗大小对杉木林内南方红豆杉生长与形质的影响 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3098−3104.
Ou J D, Wu Z Z, Luo N. Effects of forest gap size on the growth and form quality of *Taxus wallichina* var. *mairei* in *Cunninghamia lanceolata* forests[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3098−3104.

[9] 张艳华, 方升佐, 田野, 等. 无性系和株行距对杨树人工林生长和树冠结构的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(5): 13−19, 94.
Zhang Y H, Fang S Z, Tian Y, et al. Effects of clone and planting spacing on growth and morphological traits of poplar plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(5): 13−19, 94.

[10] 刘涛, 王家妍, 李万年, 等. 杉木 × 观光木异龄复层混交对林木生长及土壤理化性质的影响 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 125−130.
Liu T, Wang J Y, Li W N, et al. Growthand soil physicochemical propertiesinthe mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongioden odorumin* different agedand multi-layer forests[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1): 125−130.

[11] 郑颖, 冯健, 于世河, 等. 辽东山区不同密度落叶松人工幼龄林林木生长和土壤养分特性 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 42(1): 1−10.
Zheng Y, Feng J, Yu S H, et al. Study on forest growth and soil nutrient characteristics of *Larix* spp. plantation with different densities in Liaodong mountainous area[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 42(1): 1−10.

[12] 欧建德, 吴志庄, 康永武. 杉莲混交林中乳源木莲生长形质、空间利用能力的混交比例效应 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44(1): 89−96.
Ou J D, Wu Z Z, Kang Y W. Effects of mixing proportion on the growth, stem form quality and spatial utilizataion ability of *Manglietia yuyuanensis* in mixed forests of *Cunninghamia lanceolata* with *M. yuyuanensis*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(1): 89−96.

[13] 杨振景, 李海瑜, 王树力. 水曲柳人工林与天然林土壤中不同形态钾素的含量与分布 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(4): 111−119.
Yang Z J, Li H Y, Wang S L. Content and distribution of different potassium forms in soil of *Fraxinus mandshurica* plantation and natural forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(4): 111−119.

[14] 马学发, 卫月华, 梁凤和, 等. 不同造林密度水曲柳人工林大径材培育首次间伐临界胸径的确定 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(8): 1−5.
Ma X F, Wei Y H, Liang F H, et al. Critical DBH of the first thinning in the cultivation of large-diameter tree in 20-year-old stands of *Fraxinus mandshurica*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(8): 1−5.

[15] 贺梦莹, 董利虎, 李凤日. 长白落叶松−水曲柳混交林不同混交方式单木冠长预测模型 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2021, 45(4): 13−22.
He M Y, Dong L H, Li F R. Tree crown length prediction models for *Larix olgensis* and *Fraxinus mandshurica* in mixed plantation with different mixing methods[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(4): 13−22.

[16] 刘可欣, 赵宏波, 张新洁, 等. 修枝强度对水曲柳光合作用及细根非结构性碳的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(11): 42−46.
Liu K X, Zhao H B, Zhang X J, et al. Effects of pruning intensity on photosynthesis and fine root non-structural carbohydrates of *Fraxinus mandshurica*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(11): 42−46.

[17] 刘悦, 谢玲芝, 张彦东, 等. 不同密度水曲柳人工林细根生物量对邻近树木胸径和距离的响应 [J]. 林业科学, 2021, 57(10): 15−22.
Liu Y, Xie L Z, Zhang Y D, et al. Responses of fine root biomass to diameters of and distances to the neighboring trees of *Fraxinus mandschurica* plantation with different stocking densities[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(10): 15−22.

[18] 张明辉, 尹昀洲, 王树力, 等. 水曲柳人工林空间结构特征对土壤养分含量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(9): 73−82.
Zhang M H, Yin Y Z, Wang S L, et al. Effects of spatial structure characteristics of *Fraxinus mandshurica* plantation on soil nutrient content[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(9): 73−82.

[19] 欧建德, 吴志庄. 幼龄南方红豆杉人工林树冠形态特征与生长形质通径分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2019, 43(4): 185−191.
Ou J D, Wu Z Z. Path analysis between canopymorphological characteristics and growth form quality of *Taxus chinensis* var. *mairei* plantation at young age[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(4): 185−191.

[20] 石小龙, 杜彦昌, 王鹏, 等. 小陇山油松人工林林冠指标相关性研究 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 67−73.
Shi X L, Du Y C, Wang P, et al. Correlation of crown indicators on *Pinus tabuliformis* plantation in Xiaolongshan Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3): 67−73.

[21] 陈雷, 孙冰, 汪贵斌, 等. 银杏果用林复合经营模式下种仁品质综合评价 [J]. 林业科学, 2016, 52(11): 63−70.
Chen L, Sun B, Wang G B, et al. A comprehensive evaluation of kernel quality under agroforestry models of *Ginkgo biloba* plantation for nut production[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(11): 63−70.

[22] Woodruff D R, Bond B J, Ritchie G A, et al. Effects of stand density on the growth of young Douglas-fir trees[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2002, 32(3): 420−427.

[23] Rai P, Viineeta, Shukla G, et al. Carbon storage of single tree and mixed tree dominant species stands in a reserve forest: case study of the eastern sub-Himalayan Region of India[J]. Land, 2021, 10(4): 435.

[24] 杨嘉麒, 邓海燕, 张港隆, 等. 4 种混交比例对桉树−红椎人工混交林生长和土壤养分的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(11): 90−97.
Yang J Q, Deng H Y, Zhang G L, et al. Effects of four mixed ratios on the growth and soil nutrient of *Eucalyptus-Castanopsis hystrix* mixed plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(11): 90−97.

[25] Pachas A N A, Shelton H M, Lambrides C J, et al. Effect of tree density on competition between *Leucaena leucocephala* and *Chloris gayana* using a Nelder Wheel trial (Ⅱ): belowground interactions[J]. Crop and Pasture Science, 2018, 69(7): 733−744.

[26] 王政权, 张彦东. 水曲柳落叶松根系之间的相互作用研究 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 346−350.
Wang Z Q, Zhang Y D. Study on the root interactions between *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii*[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2000, 24(3): 346−350.

[27] 吴慧, 王树力. 天然次生林转变成长白落叶松人工林后土壤养分的变化 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(4): 54−58.
Wu H, Wang S L. Change of soil nutrients after converting natural secondary forest into *Larix olgensis* plantations[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(4): 54−58.

[28] 张培, 庞圣江, 杨保国, 等. 不同混交模式对桉树林分生长、凋落物量和土壤养分的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49(2): 31−37.
Zhang P, Pang S J, Yang B G, et al. Effects of different mixing patterns on growth, litter production and soil nutrients in Eucalyptus plantations[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(2): 31−37.

[29] 韩飞, 李凤日, 梁明. 落叶松人工林林分密度对节子和干形的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(6): 4−8.
Han F, Li F R, Liang M. Influence of stand density on knot and stem form of larch[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(6): 4−8.

[30] 尤健健, 张文辉, 邓磊. 油松中龄林间伐的密度效应 [J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 172−177.
You J J, Zhang W H, Deng L. Intermediate cutting density effects on middle-aged *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1): 172−177.

[31] 冯健, 高慧淋, 王骞春, 等. 辽东山区落叶松−水曲柳混交林及其纯林生长与生物量分配特征 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(7): 22−27.
Feng J, Gao H L, Wang Q C, et al. Growth and biomass allocation of mixed larch-ash forest and its pure stand in the eastern mountainous area of Liaoning Province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(7): 22−27.

[32] 郑颖, 冯健, 于世河, 等. 初植密度对 4 个落叶松无性系生长与干形的影响 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2021, 45(6): 72−80.
Zheng Y, Feng J, Yu S H, et al. Effects of initial planting density on growth and stem form of four *Larix* clones[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(6): 72−80.

[33] 杨贤宇, 李守中, 宋铁燕, 等. 长汀侵蚀退化区砍伐迹地马尾松种群动态 [J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3175−3182.
Yang X Y, Li S Z, Song T Y, et al. Population dynamics of *Pinus massoniana* in the logged forestland of Changting's eroded and degraded region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3175−3182.

（责任编辑 范 娟
责任编委 张会儒）