



坡向对冀北山地蒙古栎幼树生长及生物量分配的影响

高青青 于小萌 许竹锐 马旭满 孟亚馨 徐学华

Effects of slope aspect on growth and biomass allocation of *Quercus mongolica* saplings in the Mountains Area of Northern Hebei Province, northern China

Gao Qingqing, Yu Xiaomeng, Xu Zhurui, Ma Xuman, Meng Yaxin, Xu Xuehua

引用本文:

高青青, 于小萌, 许竹锐, 马旭满, 孟亚馨, 徐学华. 坡向对冀北山地蒙古栎幼树生长及生物量分配的影响[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12):1–10. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230160

Gao Qingqing, Yu Xiaomeng, Xu Zhurui, Ma Xuman, Meng Yaxin, Xu Xuehua. Effects of slope aspect on growth and biomass allocation of *Quercus mongolica* saplings in the Mountains Area of Northern Hebei Province, northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(12):1–10. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230160

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230160>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同地理种源云南松幼苗生物量分配及其异速生长

Biomass allocation and allometry of *Pinus yunnanensis* seedlings from different provenances

北京林业大学学报, 2019, 41(4): 41–50. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180371>

云南松不同家系苗木生物量分配及其异速生长

Biomass allocation and its allometric growth of *Pinus yunnanensis* seedlings of different families

北京林业大学学报, 2021, 43(8): 18–28. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200142>

银杏生物量分配格局及异速生长模型

Biomass allocation patterns and allometric models of *Ginkgo biloba*

北京林业大学学报, 2017, 39(4): 12–20. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160374>

基于DEM与太阳辐射的北京市山地坡向提取方法研究

Extraction method of slope aspect based on DEM and solar radiation in mountain area of Beijing

北京林业大学学报, 2018, 40(1): 67–73. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170311>

长白山自然保护区蒙古栎幼树生理生长特性随海拔梯度的变化

Physiological and growth variations of *Quercus mongolica* saplings along an elevational gradient in Changbai Mountain Nature Reserve, northeastern China

北京林业大学学报, 2019, 41(11): 1–10. <https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190095>

立地条件对宁夏中部干旱风沙区柠条生物量分配格局的影响

Effects of site conditions on biomass allocation patterns of *Caragana korshinskii* in arid aeolian sand regions, middle area of Ningxia of northwestern China

北京林业大学学报, 2020, 42(12): 91–100. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200162>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20230160

坡向对冀北山地蒙古栎幼树生长及生物量分配的影响

高青青 于小萌 许竹锐 马旭满 孟亚馨 徐学华

(河北农业大学林学院, 河北 保定 071000)

摘要:【目的】探讨冀北山地不同坡向对蒙古栎幼树生长及生物量分配的影响,旨在为该地区蒙古栎造林提供科学依据。【方法】本研究以冀北山地东坡、东南坡、西坡蒙古栎 9 年生幼树为研究对象,测定各坡向蒙古栎幼树地径、株高、冠幅及各器官生物量。采用单因素方差分析法检验各坡向蒙古栎幼树地径、株高、冠幅及生物量是否存在显著差异。以标准化主轴估计法检验各坡向蒙古栎幼树器官生物量间的异速生长关系。【结果】(1)东坡地径、株高均显著大于东南坡,其中地径差值 0.29 cm,株高差值 11.81 cm,两坡间冠幅无显著差异。西坡地径、株高、冠幅均显著小于东坡和东南坡;地径-株高生长曲线斜率表现为东南坡(0.458)最大,东坡(0.377)居中,西坡(0.349)最小。(2)总生物量积累在东坡(1 144.50 g/株)和东南坡(961.58 g/株)间无显著差异,西坡(365.33 g/株)显著小于东坡和东南坡;东坡和东南坡间叶、干、根生物量积累无显著差异,而东坡枝生物量积累(217.59 g/株)显著大于东南坡(159.17 g/株)。西坡各器官生物量积累均显著小于其他两坡向。(3)生物量分配比表现为西坡枝(13.32%)、干(24.10%)生物量分配比显著小于其他两坡向,而根生物量分配比(44.79%)显著大于其他两坡向(东坡 34.28%;东南坡 32.67%)。东坡枝生物量分配比显著大于东南坡,而叶分配比显著小于东南坡,干和根生物量分配比在东坡和东南坡间无显著差异。(4)各坡向成对器官生物量均呈等速生长关系,但呈现不同的器官分配趋向。【结论】蒙古栎幼树在 3 个坡向表现出不同的生长规律,东坡是蒙古栎幼树生长的最佳坡向。

关键词: 坡向; 生物量分配; 异速生长; 蒙古栎; 冀北山地

中图分类号: S792.186 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2023)12-0049-10

引文格式: 高青青, 于小萌, 许竹锐, 等. 坡向对冀北山地蒙古栎幼树生长及生物量分配的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 49-58. Gao Qingqing, Yu Xiaomeng, Xu Zhurui, et al. Effects of aspect on growth and biomass allocation of *Quercus mongolica* saplings in the mountain area of northern Hebei Province, northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 49-58.

Effects of aspect on growth and biomass allocation of *Quercus mongolica* saplings in the mountain area of northern Hebei Province, northern China

Gao Qingqing Yu Xiaomeng Xu Zhurui Ma Xuman Meng Yaxin Xu Xuehua

(College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to explore the effects of different aspects on the growth and biomass allocation of *Quercus mongolica* saplings in the mountain area of northern Hebei Province of northern China, so as to provide scientific basis for the afforestation of *Quercus mongolica* in the area. [Method] The 9-year-old *Quercus mongolica* saplings on the east, southeast and west aspects of the mountain area of northern Hebei Province were selected. The basal diameter, plant height, crown width and organ biomass were measured in different aspects. One-way analysis (ANOVA) was used to test whether there were significant differences in basal diameter, plant height, crown width and biomass among the aspects. The method of standardized main axis estimation was used to test the allometric relationship

收稿日期: 2023-06-27 修回日期: 2023-08-20

基金项目: 河北省科技计划项目(17236801D-2), 河北省重点研发计划项目(19226814D)。

第一作者: 高青青。主要研究方向: 植物功能性状。Email: 2649809959@qq.com 地址: 071000 河北省保定市莲池区乐凯南大街 2596 号。

责任作者: 徐学华, 副教授。主要研究方向: 森林生态系统结构与功能研究。Email: xuehuaxu2001@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

between the organ biomass of *Quercus mongolica* saplings in different aspects. [Result] (1) The basal diameter and plant height of the east aspect were significantly larger than those of the southeast aspect, with a difference of 0.29 cm in ground diameter and 11.81 cm in plant height. And there was no significant difference in crown width between the east aspect and the southeast aspect. The basal diameter, plant height and crown width of the west slope were significantly smaller than those of the east slope and the southeast slope. The slope of diameter-height curve was highest on the southeast slope (0.458), centered on the east slope (0.377), and lowest on the west slope (0.349). (2) There was no significant difference in total biomass accumulation between the east slope aspect (1 144.50 g/tree) and the southeast aspect (961.58 g/tree), and the west aspect (365.33 g/tree) was significantly smaller than the east aspect and the southeast aspect. There was no significant difference in biomass accumulation of leaves, trunks, and roots between the east aspect and the southeast aspect. The biomass accumulation of stems on the east slope (217.59 g/tree) was significantly higher than that on the southeast slope (159.17 g/tree). The biomass accumulation of all organs on the west aspect was significantly lower than that on the other two slopes. (3) The biomass allocation ratio of stems (13.32%) and trunks (24.10%) on the west aspect was significantly lower than that on the other two aspects, while the root biomass allocation ratio on the west aspect (44.79%) was significantly higher than that on the other two slopes (east aspect 34.28%; southeast aspect 32.67%). The stem biomass allocation ratio on the east aspect was significantly higher than that on the southeast aspect, while the leaf allocation ratio on the eastern aspect was significantly lower than that on the southeast aspect. And the trunk and root allocation ratio had no significant difference between the east aspect and the southeast aspect. (4) The biomass of paired organs in each slope direction showed an isokinetic growth relationship, but it showed different organ allocation trends. [Conclusion] *Quercus mongolica* saplings show different growth patterns in the three slope directions, and the east aspect is the optimal aspect for it.

Key words: aspect; biomass allocation; allometry; *Quercus mongolica*; mountain area of northern Hebei Province

植物性状包括全株植物性状、枝干性状、地下性状等,地径和树高作为全株植物性状,能直观的反应植物的生长状况。植物各个表型特征的生长状况和生长关系^[1]可用生长曲线表述,生长曲线也可用于预估林木的生长趋势^[2]等。植物表型特征等的差异通常也会引起生物量分配的差异,生物量的分配可以看作植物吸收碳、水分和养分供未来使用能力的驱动力^[3],植物在生长发育过程中通过不断调整生物量的分配策略来适应环境胁迫和降低逆境伤害,从而提高资源的利用效率及对环境的适应性^[4]。目前关于生物量分配的理论主要有最优分配理论和相关生长关系理论,最优分配理论认为植物通过改变各器官生物量的分配比例,优先将生物量分配给能够获取受限资源的器官,从而增强对养分、水分和光照等资源的获取能力,使其生长速率最大化^[5-6];而相关生长关系理论认为生物量分配是与植物个体大小有关的幂函数关系,无论资源状态如何,生物量对地上部分和地下部分的分配都保持相对恒定,具有相同的分配速率(等速生长)^[7],将两者结合可以更好的理解植物生长与环境的关系。

植物与环境间的相互关系一直是全球气候变化

背景下植物生态学的研究热点^[8],已有大量研究表明植物在受到温度、水分以及土壤养分等各种环境因子的影响时,会做出相应的响应^[9-11]。地形是影响树木生长和造林效果的关键因子,坡向作为重要的地形因子之一,影响着光照、温度、水分、养分等的再次分配,造成局部气温、降雨以及土壤理化性质等的差异,形成坡向特有的微生境^[12],进而对植物性状、生物量的积累和分配产生影响。已有研究表明,植物在温度较低的坡向,通常有较高的地下生物量分配比例,以及地上-地下异速的生长关系^[10-11],而其异速生长关系受物种影响也可能呈现为等速关系,植物在不同生长环境中,通常会受资源限制或因自身遗传特性而表现出不同的生存策略^[11]。

蒙古栎(*Quercus mongolica*)是中国东北和华北山地天然次生林的主要组成树种^[13],也是冀北山地造林的重要树种^[14],具有十分重要的经济和生态价值。目前蒙古栎的相关研究多集中于种质筛选、育苗及天然次生林种群等^[15-17],有关蒙古栎人工造林方面的研究较少。且已有相关研究主要集中在东北地区^[18-19],而在冀北山地开展有关蒙古栎造林的研究则较少。坡向作为冀北山地影响树木生长的关键

地形因子,该地区蒙古栎幼树径向和高生长随坡向呈现怎样的变化规律?以及蒙古栎幼树各器官生物量分配格局随坡向的变化规律如何尚未可知。因此,本研究以冀北山地五道沟分场不同坡向 9 年生蒙古栎幼树为研究对象,分析不同坡向蒙古栎幼树的径向生长、高生长、生物量分配格局以及生长关系,揭示坡向对蒙古栎幼树生长和生物量分配格局的影响规律,为该地区蒙古栎人工造林提供科学指导。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

本试验地在河北省木兰围场国有林场五道沟分场,该地属寒温带大陆性季风气候。年均气温 $-1.4 \sim 4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;年均无霜期约 60 d;年均降水量约为 400 ~ 500 mm。土壤有棕壤、草甸土、褐土、风沙土、黑土等多种类型。分布有大面积蒙古栎、黑桦(*Betula dahurica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等天然次生林以及人工林。该蒙古栎试验地建于 2017 年,在东坡、东南坡、西坡(全光条件下,无上层木)分别均匀种植一定面积的蒙古栎 4 年生营养杯苗,地径、株高和种植密度基本一致,成活率 100%。样地基本概况见表 1。

表 1 样地基本概况

Tab. 1 Basic information of sample plots

坡向 Aspect	坡度 Gradient/($^{\circ}$)	海拔 Altitude/m	种植密度/(株·hm $^{-2}$) Planting density/(tree·ha $^{-1}$)
东 East	16	1 494	3 900
东南 Southeast	14	1 504	3 900
西 West	21	1 478	4 000

1.2 样地设置

于 2022 年 7—8 月选择东坡、东南坡、西坡蒙古栎幼苗,每个坡向设置 3 个 20 m $\times$ 20 m 样地,对样地的坡度、海拔等信息进行调查。

1.3 样品采集及指标测定

对每个样地内蒙古栎幼树进行每木检尺,测量其地径、株高、以及冠幅(东西、南北)。每个样地挖取标准株 5 棵,每个坡向挖掘 15 株,共计 45 棵,采取整株挖掘。获取目标树的全部细根在实际操作中非常困难和不现实,且细根对根系总生物量影响较小^[20-21],本试验目标为幼树,可尽量将整个树根(包括细根)全部挖掘出来。依据树冠大小初步确定所挖土球尺寸,在挖掘过程中可顺着根系延伸方向扩展挖掘。挖出完整土球后,轻轻拍打土球使土缓慢松动掉落,尽量保证细根完整性。之后分离叶、枝、干、根,放入袋内带回实验室。用水清洗植株地下部

分,将各样品在烘箱中 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青后,85 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至质量恒定,用电子天平称量干质量,计算各器官生物量,总生物量为各器官生物量总和,地上生物量为叶、枝、干生物量之和。

1.4 数据处理

不同坡向之间的植物生长特征、生物量差异采用单因素方差分析法进行显著性分析。胸径-株高生长曲线处理^[22],取胸径为 x ,株高为 y ,拟合多种曲线,选择与胸径-株高散点图拟合最佳的曲线方程。上述试验数据在 Excel 2016 和 SPSS 21.0 统计软件中进行整理分析。

生物量采用异速生长计算公式拟合^[23]。

$$Y = aX^b$$

式中: X 与 Y 代表各坡向蒙古栎幼树某器官(根、枝、干、叶)的生物量, a 为参数,设对数方程斜率 b 为异速生长指数。

方程可转化为 $\lg Y = \lg a + b \lg X$, $\lg a$ 为截距, b 为斜率, $b = 1$ 为等速生长关系, $b \neq 1$ 为异速生长关系,检验斜率间及其与 1.0 的差异性。位于不同坡向的植物各部分生物量呈等速生长关系时,进一步检验不同坡向上是否存在截距漂移和共轴漂移,依据异速生长指数和截距的差异性,不同植物间的异速生长关系的差异性可分为以下几种类型:A 型漂移(b 差异显著)、B 型漂移(b 相同,截距差异显著但具有共同拟合轴,称为截距漂移)、C 型漂移(b 相同,截距相同但拟合轴发生漂移,称为共轴漂移)和 D 型漂移(B 和 C 同时发生),而如果斜率和截距相同且共轴,表明这些类群的相关指标间具有完全相同的异速生长关系。分析方法采用标准化主轴估计法,各参数的确定、截距漂移检验和共轴漂移检验均在 R 语言中 SMATR Version 2.0 板块完成,作图在 SigmaPlot 12.5 中完成。

2 结果与分析

2.1 坡向对蒙古栎幼树生长的影响

2.1.1 坡向对蒙古栎幼树地径、株高和冠幅的影响

表 2 显示:3 个坡向间蒙古栎幼树地径、株高均有显著差异($P < 0.05$)。东坡、东南坡间蒙古栎幼树冠幅无显著差异($P > 0.05$),西坡蒙古栎幼树冠幅与东坡、东南坡均差异显著($P < 0.05$)。东坡蒙古栎幼树地径均值最大,东南坡次之,西坡最小。其中,东坡与西坡差值最大,为 1.26 cm,相比增大 57.3%;东坡与东南坡差值最小,为 0.29 cm,相比增大 9.1%。株高和地径呈现相同的趋势,东坡蒙古栎幼树株高均值最大,东南坡次之,西坡最小。其中,西坡株高与东坡间差值 73.64 cm,与东南坡间差值 61.82 cm;

表 2 不同坡向蒙古栎幼树生长状况

Tab. 2 Growth condition of *Quercus mongolica* saplings in different aspects

坡向 Aspect	地径 Basal diameter	株高 Plant height	冠幅 Crown diameter
东 East	3.46 ± 0.04 a	185.53 ± 1.92 a	95.10 ± 1.03 a
东南 Southeast	3.17 ± 0.04 b	173.71 ± 2.00 b	96.19 ± 1.49 a
西 West	2.20 ± 0.03 c	111.89 ± 1.63 c	60.87 ± 0.87 b

注: 同列不同小写字母表示坡向间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: different lowercase letters in the same column indicate significant differences among aspects ($P < 0.05$).

东坡与东南坡差值最小, 为 11.82 cm。冠幅则表现为东南坡均值最大, 东坡次之, 西坡最小, 西坡显著小于两坡向, 东南坡与东坡冠幅无显著差异。

2.1.2 坡向对蒙古栎幼树生长曲线的影响

经拟合, 各模型拟合 R^2 值相差不大, 均在 0.55 ~ 0.65 之间, 此生长曲线不做预测用, 只用于分析理解地径与株高之间的生长关系, 即对各 R^2 值予以采信, 且除线性模型外, 其他模型拟合与散点图均有部分离散现象, 最终选取线性模型为本研究的拟合曲线。3 个坡向地径-树高生长曲线如图 1。东坡 $Y_a = 0.377X_a + 0.562 (R^2 = 0.586)$ 、东南坡 $Y_b = 0.458X_b + 0.285 (R^2 = 0.649)$ 、西坡 $Y_c = 0.349X_c + 0.354 (R^2 =$

0.535), 3 个坡向地径-株高生长曲线斜率表现为东南坡(0.458)最大, 东坡(0.377)次之, 西坡(0.349)最小。总体来看, 相对于东坡和西坡, 东南坡地径的增加往往伴随着相对更大的株高增长速度, 而西坡株高增长量相对最低, 东坡居中。

2.2 坡向对蒙古栎幼树生物量积累与分配的影响

由图 2a 可知, 枝、干、根以及总生物量均表现为东坡最大, 东南坡次之, 西坡最小。枝生物量在 3 个坡向间均有显著差异 ($P < 0.05$), 干、根以及总生物量表现为东坡和东南坡间无显著差异, 而这两坡向均与西坡有显著差异 ($P < 0.05$)。叶生物量表现为东南坡略大于东坡, 但两坡向间无显著差异, 而东坡和东南坡则显著大于西坡 ($P < 0.05$)。

由图 2b 可知, 叶生物量分配比在东坡(16.22 ± 0.77)% 与东南坡(19.80 ± 0.72)% 间差异显著 ($P < 0.05$), 西坡与东坡、东南坡无显著差异; 枝生物量分配比在 3 个坡向间均有显著差异 ($P < 0.05$), 表现为东坡(18.86 ± 0.77)% > 东南坡(16.56 ± 0.47)% > 西坡(13.32 ± 0.77)%; 干、根及地上生物量分配比均表现为东坡与东南坡间无显著差异, 而均与西坡差异显著。干生物量分配比表现为东坡(30.64 ± 1.22)%、东南坡(30.97 ± 1.06)% 显著大于西坡(24.10 ±

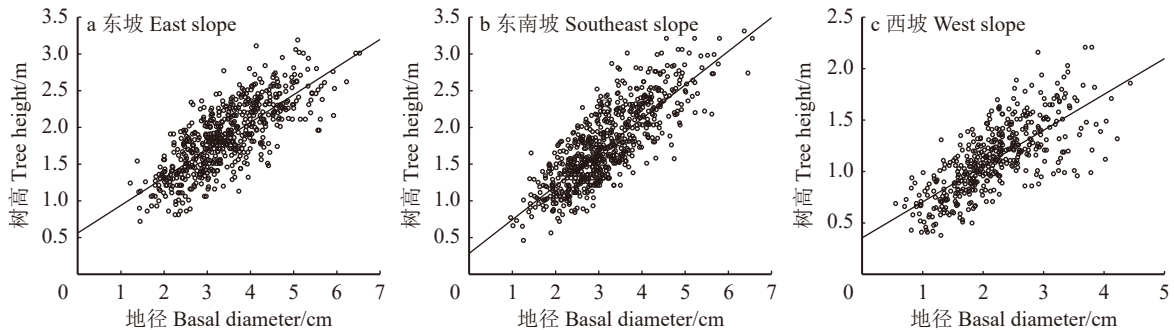
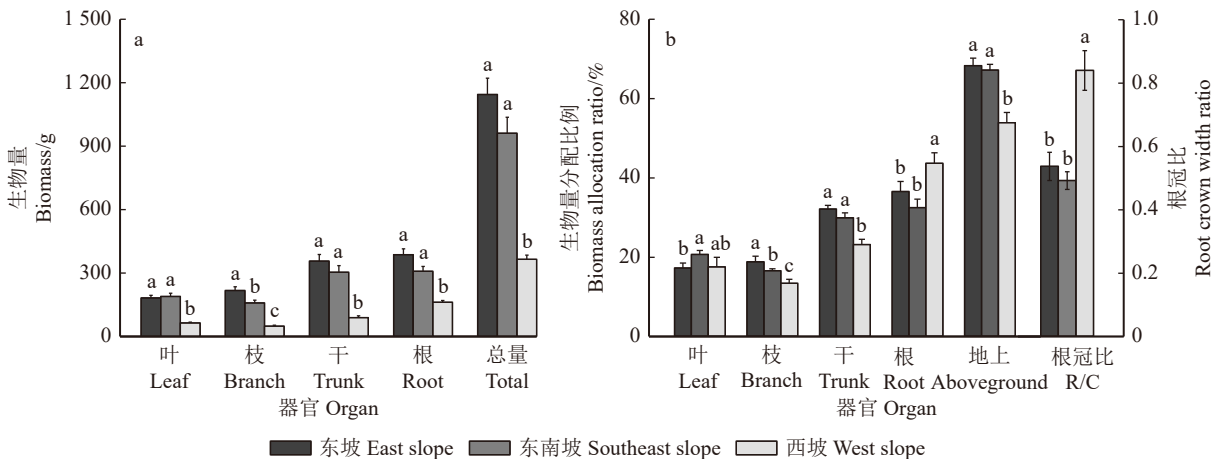


图 1 不同坡向蒙古栎幼树地径-株高拟合曲线

Fig. 1 Basal diameter-tree height fitting curves of *Quercus mongolica* saplings in different aspects



不同小写字母表示坡向间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among aspects ($P < 0.05$).

图 2 不同坡向蒙古栎幼树生物量积累与分配特征

Fig. 2 Biomass accumulation and allocation characteristics of *Quercus mongolica* saplings in different aspects

1.23)%, 地上生物量分配比与其呈现相同趋势。根生物量分配比则表现为东坡(34.28 ± 1.69)%、东南坡(32.67 ± 1.27)% 显著小于西坡(44.79 ± 1.83)%。不同坡向根冠比与根生物量分配比呈现相同趋势。

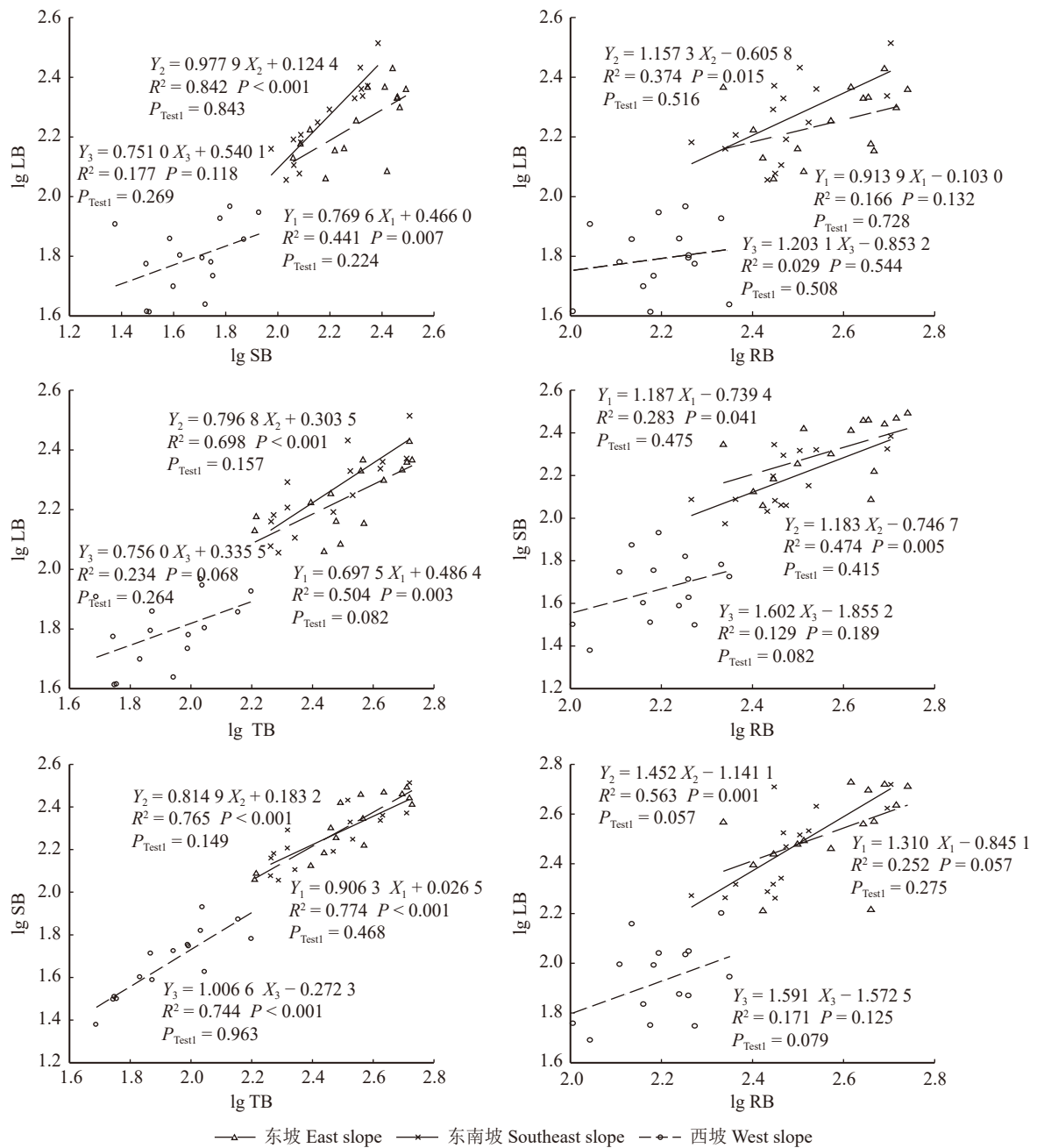
总体上, 东坡生物量($1\,144.50 \pm 77.46$) g 积累最高, 东南坡(961.58 ± 75.73) g 次之, 西坡(365.33 ± 19.87) g 最低; 与东坡和东南坡相比, 西坡显著减少了地上部分的分配比, 显著增加了地下部分的分配比($P < 0.05$), 东坡和东南坡地上和地下分配比例则

无显著差异($P > 0.05$)。

2.3 坡向对蒙古栎幼树生物量异速生长关系的影响

各坡向成对器官异速生长指数与 1.0 差异均不显著(图 3)。对不同坡向各器官间成对生物量的异速生长关系进行共同轴检验和漂移类型分析发现(表 3), 其在 3 个坡向间的拟合曲线均有共同轴($P > 0.05$), 但在 3 个坡向间均存在不同程度的截距漂移或共轴漂移, 即呈现不同的异速生长模式。

叶-枝、叶-根异速生长关系指数(图 3, 表 3)均



Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别为东坡、东南坡、西坡异速生长方程; P_{Test1} 为异速生长指数与 1.0 之间差异性检验; LB、SB、TB、RB 分别为叶生物量、枝生物量、主干生物量、根生物量。 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 are allometric growth equations on the east, southeast and west slopes, respectively; P_{Test1} indicates the significance test for difference between allometric growth index and 1.0; LB, SB, TB, RB are leaf biomass, stem biomass, trunk biomass, root biomass, respectively.

图 3 不同坡向蒙古栎幼树器官生物量异速生长关系

Fig. 3 Relationship between allometric growth of organ biomass of *Quercus mongolica* saplings in different aspects

表 3 不同坡向蒙古栎幼树各器官生物量间共同斜率检验及异速生长关系漂移类型

Tab. 3 Common slope test of biomass and drift type of allometric growth relationship of various organs of *Quercus mongolica* saplings in different aspects

Y	X	共轴斜率 Coaxial slope	共轴检验P值 P value of coaxial test	共轴漂移检验P值 P value of coaxial drift test	截距漂移检验P值 P value of intercept drift test	漂移类型 Shift type
叶生物量 Leaf biomass	枝生物量 Branch biomass	0.901 7	0.454	$P < 0.001$	$P < 0.001$	D
	干生物量 Trunk biomass	0.757 3	0.853	$P < 0.001$	$P = 0.08$	C
	根生物量 Root biomass	1.086 8	0.737	$P < 0.001$	$P = 0.004$	D
枝生物量 Branch biomass	干生物量 Trunk biomass	0.903 2	0.567	$P < 0.001$	$P = 0.027$	D
	根生物量 Root biomass	1.280 0	0.635	$P < 0.001$	$P = 0.066$	C
干生物量 Trunk biomass	根生物量 Root biomass	1.444 0	0.864	$P < 0.001$	$P = 0.118$	C

注: C. 共轴漂移; D. 截距漂移和共轴漂移同时发生。Notes: C, Intercept drift; D, Intercept drift and coaxial drift occurred at the same time.

表现为东南坡略大于其他两坡向, 共轴检验发现坡向间存在 D 型漂移。其中, 叶-枝在东坡和东南坡间发生截距漂移(B 型漂移), 西坡和两坡向间发生共轴漂移(C 型漂移)。叶-根东南坡与其他两坡向存在截距漂移(B 型漂移), 西坡与其他两坡存在共轴漂移(C 型漂移); 叶-干生长关系指数在西坡与其他两坡向间存在共轴漂移(C 型漂移); 枝-干异速生长关系指数在坡向间存在 D 型漂移。其中, 东坡与东南坡间存在截距漂移(B 型漂移), 西坡则与其他两坡向间存在共轴漂移(C 型漂移); 枝-根异速生长关系指数在 3 个坡向间均有显著的共轴漂移(C 型漂移)。其中, 东坡与东南坡间漂移量为 0.258, 西坡与东南坡漂移量为 0.866, 西坡与东坡漂移量为 1.124 (Wald 检验, $P < 0.001$)。干-根异速生长关系在西坡与其他两坡向发生了显著的共轴漂移(C 型漂移)。

综上结果表明, 东坡与东南坡之间成对器官叶-枝、叶-根、枝-干生长指数发生了截距漂移, 则说明, 这些成对器官间在两坡向间存在器官生物量分配偏向的差异, 且有一定的分配速率差。另外, 在所有成对生物量异速生长关系共同轴检验中, 西坡均与其他两坡向发生了显著的共轴漂移(C 型漂移), 可能是西坡生物量积累显著小于其他坡向的原因, 导致其与其他两坡向间在 X 轴的取值范围有较大差异。

3 讨 论

3.1 坡向对蒙古栎幼树的生长状况的影响

在山地森林生态系统中, 坡向影响光照、水分、风等环境因子的组合变化, 综合影响着植物的生存条件, 进而形成了坡向特有的植物生长规律与空间分布格局^[24]。植物经过环境筛选后形成的性状组合, 称为“生态策略”^[25]。株高作为植物生态策略的核

心部分, 是决定植物对光获取能力的重要因素, 和植物的碳储存能力有关^[26]。地径与植物的机械支撑、水分吸收能力有关^[27]。冠层作为光合作用、蒸腾作用等与树木生长有关的关键生理过程发生的场所, 是树木与其周围环境相互作用的重要部位^[28]。且林木株高、径向生长的状况, 是计算材积、生物量等的重要参数, 可以反映植物生长发育、生物量积累等状况^[29]。本研究中, 东坡地径、株高显著大于其他两坡向, 冠幅显著大于西坡向, 略小于东南坡, 但与其无显著差异, 东坡是 3 个坡向中蒙古栎幼树生长最佳的坡向。东南坡地径、株高虽显著小于东坡, 但差值相较不大, 且冠幅与东坡无显著差异, 并略大于东坡。这也与王东等^[30]的研究结果相一致, 在环境条件较适宜的坡向, 植株通常同时表现出较好的径向生长和高生长。

有研究表明^[31-32], 光照充足情况下, 植物幼苗易呈现出“矮粗”的生长特征, 光照不足的环境下呈现出“细长”的生长特征, 薛思雷等^[33]研究表明, 蒙古栎幼苗喜欢充足的光照条件, 东南坡相较于东坡, 光照更加充足, 但地径却略小于东坡, 可能原因是东南坡光照充足使得温度较高, 导致水分蒸散较多^[34], 植株向上运输水分减少, 植株叶片也相应降低气孔导度以减少内部水分散失, 同时也限制了外部二氧化碳进入叶片, 使得光合碳同化能力降低, 最终使生长相对受限, 进而也迫使植物采取适当降低高生长的策略, 以减小水分运输阻力^[35-36], 以达到生长平衡, 这可能也是导致东南坡与东坡冠幅无显著差异, 地径、株高却显著小于东坡的原因。东坡植株对树高的投入延长了其光照时间^[36], 使其进一步提高了光捕获能力, 所以东坡光照环境并未对其产生生长抑制, 蒙古栎在东坡生长状况好于东南坡。地径-株高生长曲线拟合结果表明, 东南坡比其他两个坡向有更大

的株高相对增长速率,但东坡的株高均值却显著大于东南坡,则可能随着幼树的成长,东南坡蒙古栎株高更大,这与前人^[37-38]研究结果相一致,其拟合结果均表示偏南向坡有更高的株高增长速率,但由于本研究中蒙古栎为幼树,地径取值范围小,不适宜用于该试验地蒙古栎幼树生长趋势的预测,仅用于理解地径-株高间的生长关系。

3.2 坡向对蒙古栎幼树生物量积累与分配格局的影响

不同器官之间的生物量分配即意味着功能性状的权衡,植物在不同环境条件下不断调节资源在各组织间的分配,以加强自身的竞争能力和对环境的适应性^[39]。东坡和东南坡叶生物量积累无显著差异,但东南坡叶片分配比例显著大于东坡,西坡虽然叶生物量积累显著小于其他两坡向,但从叶分配比来说,与其他两坡向无显著差异。叶片是植物进行光合作用和蒸腾作用的主要器官,是植物实现物质生产以及生物量积累的重要构件^[40]。东南坡光照较其他两坡向充足,却出现东南坡叶分配比大于东坡,原因可能是东南坡存在的叶片光合碳同化抑制^[41],导致其采取增大叶分配比的策略来减弱可能面对的叶获取资源的限制;枝干有着保护、支撑整株植物的功能,可以在根叶间运输水分养分同时贮存大量的有机物质^[42]。以往有研究表明,植物通过调整较多资源供给横向枝条,促进其生长,以增加其捕获光能的可能性,东坡表现为显著增大的枝生物量及其分配比例,而东南坡则正好相反,这可能东坡蒙古栎植株通过增加枝生长,以调整冠型来适应较为不足的光照条件^[43]。

影响生物量积累与分配的生物和非生物因素很多^[44],比如温度、降水量以及土壤质地等。根据最优分配理论,植物将生物量优先分配给能获取受限资源的器官。西坡根系生物量积累显著小于其他两坡向,但其分配比却极显著大于其他两坡向。根系具有从土壤中吸收水分、养分以及储存营养物质的作用^[45],植物为了适应低温或根系可获取资源限制的环境,通过对地上部分生长的弱化,将更多光合产物分配到地下部分来降低不利环境的影响^[46],则可以看出,西坡土壤条件相对限制了蒙古栎幼树的生长,导致了西坡蒙古栎幼树较大的根冠比,而东坡和东南坡之间根系生物量累积及其生物量分配比则无显著差异,这与前人^[11,47]研究结果相符合,即植物在偏南坡往往拥有更少的根系分配,由此看来,东坡、东南坡土壤环境均较适宜蒙古栎幼树的生长。总体来说,东坡和东南坡总生物量显著大于西坡,其与这两坡向地径、株高、冠幅较大直接相关。东坡略大于东南坡,但并无显著差异,从生物量积累的角度来看,

东坡和东南坡均为蒙古栎幼树生长的适宜坡向。

3.3 坡向对蒙古栎幼树的生物量异速生长关系的影响

植物各器官生长速度不成比例或不均衡的现象即为异速生长,它能体现植物对差异性生境的生态适应策略。相关生长理论认为,植物生长过程中,各器官间呈等速生长关系,并已得到大量证明^[48],但物种、环境、干扰等因素会引起植物资源的偏向分配。在叶-根生物量异速生长关系检验中,西坡与东南坡发生了截距负漂移,即代表在叶-枝器官间,西坡更偏向根系生物量的分配,而有较少的叶分配。东坡和东南坡之间异速生长分析表明,成对器官叶-枝、叶-根、枝-干生长指数发生了截距漂移,枝-根异速生长关系发生了共轴漂移。其中,东坡叶-枝、叶-根生长关系相对东南坡发生截距正漂移,则说明东坡相比于东南坡有偏向枝、根的生物量分配趋向,东南坡则有较多的叶生物量分配,较少的枝、根分配。枝-根异速生长关系检验中,东南坡相对东坡发生了共轴负漂移,则说明枝-根生长关系中东南坡相较根系生物量积累较少。异速生长关系检验也与生物量积累与分配特征研究结果相一致,且本研究中,西坡所有成对器官生物量间异速生长检验均与其他两坡向发生了显著的共轴漂移,这可能是因为西坡各器官生物量积累显著少于其他两坡向。

经检验,各坡向成对器官异速生长指数均与 1 差异不显著,呈现等速生长模式,进一步证明了相关生长理论^[49]。表明蒙古栎幼树经过一定的适应期,现阶段已对 3 个坡向的环境形成了较稳定的适应性,各器官间保持了相似的稳定分配速率。但其等速生长关系,并未引起各坡向蒙古栎幼树分配比的趋同,可见等速生长关系并不意味着两器官的生物量累积及其投入比例具有相似性,而是指当植物增加一个器官的生物量分配时,同时也会相应增加另一个器官的生物量分配。而本研究中的西坡向的地下可获取资源受限,其增加了根系生物量投入,当根系可获取资源增多时,植株必然也会提高对光合产物的需求,进而也有相应的光合器官的生物量分配^[50],导致西坡虽地上生物量分配显著小于其他两坡向,叶分配比却与其他两坡向无显著差异。

本文探讨了各坡向对蒙古栎幼树生长及生物量分配的综合效应,对具体的坡向环境条件如坡向温度、土壤养分等的状况未做探究,今后可结合具体的坡向环境因子、土壤因子状况深入探究坡向对蒙古栎生长的影响,为该地区蒙古栎造林提供指导。

4 结 论

(1) 东坡蒙古栎幼树地径、株高均显著大于东南

坡;东南坡冠幅显著大于西坡,与东坡无显著差异但略大于东坡;西坡地径、株高、冠幅均显著小于东坡、东南坡。(2)东坡与东南坡总生物量积累无显著差异,且均显著大于西坡;与东南坡相比,东坡器官生物量分配表现为减少叶生物量分配而增加枝生物量分配,东南坡则表现为增加叶生物量分配比例而减少枝生物量分配比例。相较其他两坡向,西坡则表现为减少枝干生物量分配而增加根系分配。(3)各坡向各器官生物量生长关系为等速生长关系,但呈现出不同的分配趋向。综上所述,本研究的东坡最适宜蒙古栎幼树生长,东南坡也是较为适宜的生长坡向,并且蒙古栎幼树在3个坡向表现出了不同的生长规律。

参 考 文 献

- [1] 姜鹏,韩璐,梁文静,等.不同生长势杉木成熟林胸径-树高生长曲线研究[J].西北林学院学报,2016,31(4):195-200.
Jiang P, Han L, Liang W J, et al. Height, DBH growth models of *Cunninghamia lanceolata* with different growth potentials[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(4): 195-200.
- [2] 曹梦,潘萍,欧阳勋志,等.基于哑变量的闽楠天然次生林单木胸径和树高生长模型研究[J].北京林业大学学报,2019,41(5):88-96.
Cao M, Pan P, Ouyang X Z, et al. Growth model of DBH and tree height for individual tree of natural secondary *Phoebe bournei* forest based on dummy variable[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(5): 88-96.
- [3] Poorter H, Niklas K J, Reich P B, et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control[J]. *New Phytologist*, 2012, 193(1): 30-50.
- [4] 赵广帅,刘珉,石培礼,等.羌塘高原降水梯度植物叶片、根系性状变异和生态适应对策[J].生态学报,2020,40(1):295-309.
Zhao G S, Liu M, Shi P L, et al. Variation of leaf and root traits and ecological adaptive strategies along a precipitation gradient on Changtang Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(1): 295-309.
- [5] McCarthy M C, Enquist B J. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation[J]. *Functional Ecology*, 2007, 21(4): 713-720.
- [6] Liu R, Yang X, Gao R, et al. Allometry rather than abiotic drivers explains biomass allocation among leaves, stems and roots of *Artemisia* across a large environmental gradient in China[J]. *Journal of Ecology*, 2021, 109(2): 1026-1040.
- [7] Niklas K J. Plant allometry: is there a grand unifying theory?[J]. *Biological Reviews*, 2007, 79(4): 871-889.
- [8] 刘晓娟,马克平.植物功能性状研究进展[J].中国科学:生命科学,2015,45(4):325-339.
Liu X J, Ma K P. Plant functional traits-concepts, applications and future directions[J]. *Scientia Sinica(Vitae)*, 2015, 45(4): 325-339.
- [9] Adler A, Karacic A, Weih M. Biomass allocation and nutrient use in fast-growing woody and herbaceous perennials used for phytoremediation[J]. *Plant and Soil*, 2008, 305(1-2): 189-206.
- [10] Reich P B, Luo Y, Bradford J B, et al. Temperature drives global patterns in forest biomass distribution in leaves, stems, and roots[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(38): 13721-13726.
- [11] 周天阳,高景,贺俊东,等.高山草地环山样带异质坡向上3种植物的株高、叶片性状与生物量分配[J].应用与环境生物学报,2018,24(3):425-433.
Zhou T Y, Gao J, He J D, et al. Plant height, leaf traits, and biomass allocation of three species at heterogeneous slope aspects along a transect in an alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, 24(3): 425-433.
- [12] 丁成琴,史海静,高原,等.地形微生境对区域温度变化的缓冲作用[J].生态学报,2023,43(12):5137-5149.
Ding C Q, Shi H J, Gao Y, et al. The buffering effect of topography induced microhabitat on regional temperature change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 5137-5149.
- [13] 张晓红,张会儒,卢军,等.长白山蒙古栎次生林群落结构特征及优势树种空间分布格局[J].应用生态学报,2019,30(5):1571-1579.
Zhang X H, Zhang H R, Lu J, et al. Community structure characteristic and spatial distribution of dominant species of secondary *Quercus mongolica* forest in Changbai Mountain, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(5): 1571-1579.
- [14] 李晓凤.冀北山地典型林分结构与生态功能研究[D].北京:北京林业大学,2017.
Li X F. Study on the structure and ecological function of typical forest stand in mountainous area of Northern Hebei Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [15] 李祉漪,战昊,张家榕,等.不同种源蒙古栎种子及其苗期生长性状变异研究[J].西北林学院学报,2023,38(1):73-79.
Li Z Y, Zhan H, Zhang J R, et al. Study on variation of seed and seedling growth traits of *Quercus mongolica* from different provenances[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(1): 73-79.
- [16] 胡雪凡,张会儒,周超凡,等.不同抚育间伐方式对蒙古栎次生林空间结构的影响[J].北京林业大学学报,2019,41(5):137-147.
Hu X F, Zhang H R, Zhou C F, et al. Effects of different thinning patterns on the spatial structure of *Quercus mongolica* secondary forests[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(5): 137-147.
- [17] 何亚婷,何友均,王鹏,等.不同经营模式对蒙古栎林土壤有机碳组分的长效性影响[J].生态环境学报,2023,32(1):11-17.
He Y T, He Y J, Wang P, et al. Effects of different forest management regimes on soil organic carbon in aggregate fraction in natural secondary *Quercus mongolica* forest[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(1): 11-17.
- [18] 孙媛姣,陆秀君,曾莞棋,等.施肥对蒙古栎幼林生长及养分含

- 量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(4): 409–418.
- Sun Y J, Lu X J, Zeng W Q. Effect of fertilization on growth and nutrient content of *Q. mongolica*[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(4): 409–418.
- [19] 马成祥, 周广胜, 宋兴阳, 等. 增温、光照时间和氮添加对蒙古栎主要物候期的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3220–3228.
- Ma C X, Zhou G S, Song X Y, et al. Effects of warming, photoperiod, and nitrogen addition on the main phenological phases of *Quercus mongolica*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3220–3228.
- [20] Wang C K. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 222(1–3): 9–16.
- [21] 汪金松, 张春雨, 范秀华, 等. 臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 3918–3927.
- Wang J S, Zhang C Y, Fan X H, et al. Biomass allocation patterns and allometric models of *Abies nephrolepis* Maxim[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 3918–3927.
- [22] 马学欣, 侯建花, 易晓梅. 不同地貌杉木人工林胸径树高生长曲线研究[J]. 华东森林经理, 2019, 33(1): 71–74.
- Ma X X, Hou J H, Yi X M. Study on the growth curve of DBH of Chinese fir plantation in different landforms[J]. East China Forest Management, 2019, 33(1): 71–74.
- [23] 李亚麒, 孙继伟, 李江飞, 等. 云南松不同家系苗木生物量分配及其异速生长[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(8): 18–28.
- Li Y Q, Sun J W, Li J F, et al. Biomass allocation and its allometric growth of *Pinus yunnanensis* seedlings of different families[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(8): 18–28.
- [24] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 等. 微地形改造的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6462–6469.
- Wei W, Yu Y, Jia F Y, et al. Research progress in the ecological effects of micro-landform modification[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6462–6469.
- [25] 张增可, 王齐, 吴雅华, 等. 基于 CiteSpace 植物功能性状的研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 1101–1112.
- Zhang Z K, Wang Q, Wu Y H, et al. Research progress on plant functional traits based on CiteSpace[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3): 1101–1112.
- [26] Moles A T, Warton D I, Warman L, et al. Global patterns in plant height[J]. Journal of Ecology, 2009, 97(5): 923–932.
- [27] 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[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 47–53.
- Li L P, Anwar M, Wang X P. Study on relationship between Height and DBH of mountain coniferous forests in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(1): 47–53.
- [28] Li Y, Wang W, Zeng W, et al. Development of crown ratio and height to crown base models for Masson pine in southern China[J]. Forests, 2020, 11(11): 1216–1233.
- [29] 李程, 罗鹏, 李志清. 红松天然林胸径生长的空间异质性及其与地形的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 129–135.
- Li C, Luo P, Li Z Q. Spatial heterogeneity of diameter at breast height growth for Korean pine natural forest and its relationship with terrain factors[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(1): 129–135.
- [30] 王东, 薛盼盼, 李裙溢, 等. 川西亚高山林线不同坡向岷江冷杉生长特征研究[J]. 陆地生态系统与保护学报, 2022, 2(2): 92–99.
- Wang D, Xue P P, Li J Y, et al. A Study on the growth characteristics of *Abies fargesii* var. *faxoniana* on different slope aspects in the timberline ecotones in the subalpine area of western Sichuan, China[J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 2022, 2(2): 92–99.
- [31] 许中旗, 黄选瑞, 徐成立, 等. 光照条件对蒙古栎幼苗生长及形态特征的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1121–1128.
- Xu Z Q, Huang X R, Xu C L, et al. The impacts of light conditions on the growth and morphology of *Quercus mongolica* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1121–1128.
- [32] 徐飞, 郭卫华, 徐伟红, 等. 不同光环境对麻栎和刺槐幼苗生长和光合特征的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3098–3107.
- Xu F, Guo W H, Xu W H, et al. Effects of light intensity on growth and photosynthesis of seedlings of *Quercus acutissima* and *Robinia pseudoacacia*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(12): 3098–3107.
- [33] 薛思雷, 王庆成, 孙欣欣, 等. 遮荫对水曲柳和蒙古栎光合、生长和生物量分配的影响[J]. 植物研究, 2012, 32(3): 354–359.
- Xue S L, Wang Q C, Sun X X, et al. Effects of shading on the photosynthetic characteristics, growth, and biomass allocation in *Fraxinus mandshurica* and *Quercus mongolica*[J]. Bulletin of Botanical Research, 2012, 32(3): 354–359.
- [34] 兰爱玉, 林战举, 范星文, 等. 坡向对青藏高原土壤环境及植被生长影响的实验研究[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1): 42–53.
- Lan A Y, Lin Z J, Fan X W, et al. Effects of aspects on soil environment and plant growth on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1): 42–53.
- [35] 党晶晶, 赵成章, 李钰, 等. 祁连山高寒草地甘肃臭草叶性状与坡向间的关系[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 23–31.
- Dang J J, Zhao C Z, Li Y, et al. Relationship between leaf traits of *Melica przewalskyi* and slope aspects in alpine grassland of Qilian Mountains, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(1): 23–31.
- [36] Falster D S, Westoby M. Plant height and evolutionary games[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2003, 18(7): 337–343.
- [37] 史元春, 赵成章, 宋清华, 等. 兰州北山侧柏株高与冠幅、胸径异速生长关系的坡向差异性[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1879–1885.
- Shi Y C, Zhao C Z, Song Q H, et al. Allometric relationship between height and crown width or diameter of *Platycladus orientalis* on different slope aspects of Lanzhou northern mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(7): 1879–1885.
- [38] 袁晓红, 李际平. 杉木人工林南北坡向树高–胸径生长曲线研

- 究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 180–183.
- Yuan X H, Li J P. Height, DBH growth model of fir artificial forest on northern and southern slopes[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(2): 180–183.
- [39] Puglielli G, Laanisto L, Poorter H, et al. Global patterns of biomass allocation in woody species with different tolerances of shade and drought: evidence for multiple strategies[J]. *New Phytologist*, 2021, 229(1): 308–322.
- [40] Peppe D J, Royer D L, Cariglino B, et al. Sensitivity of leaf size and shape to climate: global patterns and paleoclimatic applications[J]. *New Phytologist*, 2011, 190(3): 724–739.
- [41] 马雪梅, 刘强, 张志东, 等. 塞罕坝机械林场华北落叶松冠层光合作用的空间异质性[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(1): 113–122.
- Ma X M, Liu Q, Zhang Z D, et al. Spatial heterogeneity of canopy photosynthesis of *larix principis-rupprechtii* in Saihanba Mechanical Forest Farm[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(1): 113–122.
- [42] 范瑞瑞. 武夷山 59 种木本植物树皮、茎干、叶片功能性状特征及其关联研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
- Fan R R. Characteristics and correlation of functional traits of bark, wood and leaf in 59 woody plants in the Wuyi Mountain, eastern China[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2018.
- [43] 冯秋红, 史作民, 董莉莉. 植物功能性状对环境的响应及其应用[J]. 林业科学, 2008, 44(4): 125–131.
- Feng Q H, Shi Z M, Dong L L. Response of plant functional traits to the environment and its application[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(4): 125–131.
- [44] Wang L, Li L, Chen X, et al. Biomass allocation patterns across China's terrestrial biomes[J]. *Plos One*, 2014, 9(4): e93566.
- [45] 李金航, 周玫, 朱济友, 等. 黄栌幼苗根系构型对土壤养分胁迫环境的适应性研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 65–77.
- Li J H, Zhou M, Zhu J Y, et al. Adaptability response of root architecture of *Cotinus coggygia* seedlings to soil nutrient stress[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3): 65–77.
- [46] 余明, 刘效东, 薛立. 温度和降水对森林生物量分配的影响研究进展[J]. 生态科学, 2021, 40(2): 204–209.
- Yu M, Liu X D, Xue L. Research on effects of temperature and precipitation on forest biomass allocation patterns[J]. *Ecological Science*, 2021, 40(2): 204–209.
- [47] 肖智勇, 李根前, 代光辉, 等. 黄土高原不同坡向中国沙棘种群生物量投资与分配[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(5): 44–46, 57.
- Xiao Z Y, Li G Q, Dai G H, et al. Biomass allocation and investment of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* populations under different aspects of slope in the Loess Plateau[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(5): 44–46, 57.
- [48] Cheng D, Zhong Q, Niklas K J, et al. Isometric scaling of above- and below-ground biomass at the individual and community levels in the understorey of a sub-tropical forest[J]. *Annals of Botany*, 2015, 115(2): 303–313.
- [49] Yang Y, Fang J, Ji C, et al. Above- and belowground biomass allocation in Tibetan grasslands[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 20(1): 177–184.
- [50] Franco A L C, Gherardi L A, de Tomasel C M, et al. Root herbivory controls the effects of water availability on the partitioning between above- and below-ground grass biomass[J]. *Functional Ecology*, 2020, 34(11): 2403–2410.

(责任编辑 孟 瑶
责任编辑 张会儒)