

色季拉山不同坡向急尖长苞冷杉生长特性研究

王涵^{1,2,3} 郭凯瑜^{1,2,3} 屈兴乐^{1,2,3} 郑维列^{1,2,3}

(1. 西藏农牧大学高原生态研究所; 2. 西藏自治区高寒植被生态安全重点实验室; 3. 青藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏林芝 860000)

摘要 为探究坡向与海拔对藏东南色季拉山急尖长苞冷杉 (*Abies georgei* var. *smithii*) 生长的影响, 本研究于色季拉山阴坡与阳坡海拔3700~4300 m范围内, 按每间隔100 m设置固定样地, 开展种群结构调查。结果显示: 在种群密度方面, 阴坡显著高于阳坡, 且随海拔升高, 种群密度在阴坡与阳坡均呈现先减小、后增大、再减小的单峰变化模式; 急尖长苞冷杉种群年龄结构属于稳定型。树高与冠幅均随海拔升高而逐渐减小; 平均胸径在阳坡表现为先增大后减小的单峰趋势, 而在阴坡则随海拔升高持续减小。阳坡个体径向生长速率显著高于阴坡, 为阴坡的2.71倍。综上, 在色季拉山区域, 阳坡的急尖长苞冷杉具有更快的生长速率、更高比例的幼树个体, 以及更为明显的种群密度增长潜力, 反映出坡向是影响该物种生长与种群动态的关键环境因子。

关键词 色季拉山; 急尖长苞冷杉; 径向生长; 径级结构

中图分类号: Q145.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-4781 (2025) 06-0701-11

DOI: 10.19707/j.cnki.jp.a.2025.06.003

Growth Characteristics of *Abies georgei* var. *smithii* on Different Slope Aspects in Sejila Mountain

WANG Han^{1,2,3}, GUO Kaiyu^{1,2,3}, QU Xingle^{1,2,3}, ZHENG Weilie^{1,2,3}

(1. Institute of Plateau Ecology, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University; 2. Key Laboratory of Alpine Vegetation Ecological Security of Xizang Autonomous Region; 3. Key Laboratory of Xizang Plateau Forest Ecology of Ministry of Education, Linzhi, Xizang 860000, China)

Abstract: To investigate the effects of slope orientation and altitude on the growth of *Abies georgei* var. *smithii* in the southeast of Xizang, fixed monitoring sites were set up at intervals of 100 meters above sea level on the shady and sunny slopes of Sejila Mount, ranging from 3700 to 4300 meters above sea level. The research results indicate that in the population density of *Abies georgei* var. *smithii*, the density on shaded slopes is higher than that on sunny slopes, and it shows a trend of first decreasing, then increasing, and then decreasing with increasing altitude; The age structure of the *Abies georgei* var. *smithii* population in Sejila Mount is a stable population; The height and crown width of *Abies georgei* var. *smithii* in different slope directions show a decreasing trend with increasing altitude, while the average breast height diameter shows an increasing and then decreasing trend on sunny slopes, and a continuous decreasing trend on shady slopes; The radial growth rate of *Abies georgei* var. *smithii* on sunny slopes is significantly higher than that on shady slopes, with the growth rate on sunny slopes

收稿日期: 2025-03-16

作者简介: 王涵 (1993-), 女, 汉族, 贵州威宁人, 硕士生。研究方向: 主要从事森林生态学研究。

通信作者: 郑维列 (1963-), 男, 汉族, 浙江玉环人, 硕士, 教授。研究方向: 主要从事植物分类学、生态学研究与教学工作。

基金项目: 西藏农牧学院研究生创新计划资助项目 (YJS2022-13), 西藏基于树木年轮学的色季拉山林线高度变化及典型树种对气候的响应; 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目 (2019QZKK1006); 阿里生态监测站2024年度监测项目 (603324091) 资助。

being 2.71 times that on shady slopes; During the growth process of *Abies georgei* var. *smithii* in Sejila Mount, the population density on the sunny slope is higher than that on the shady slope. Compared with the shady slope, the growth rate of *Abies georgei* var. *smithii* on the sunny slope is faster, the proportion of small trees is higher, and the trend of increasing population density on the sunny slope is more obvious.

Key words: Sejila Mountain; *Abies georgei* var. *smithii*; Radial growth; Diameter class structure

全球气候变暖背景下, 青藏高原东南部升温的速率高于全球平均水平, 青藏高原自然原始的状态是开展相关研究的理想场所。由于地表所获热量的不同, 坡向、海拔会对局部区域的太阳辐射和降水进行二次分配, 进而影响森林群落分布和树木生长^[1]。在气候变化影响下, 长白山岳桦 (*Betula ermanii*) 不同坡向的种群扩张有明显差异, 表现为: 东坡 > 东南坡 > 东北坡^[2]。在幼苗定居和存活方面, 西藏东南部阳坡的急尖长苞冷杉幼苗生长季冻害事件的频率、强度和持续时间明显高于阴坡^[3]。在树木竞争强度方面, 藏东南急尖长苞冷杉不同径级竞争强度随个体胸径的增大而减小最后趋于平缓^[4]。然而, 对急尖长苞冷杉在不同坡向、不同海拔的种群径级结构、树木形态大小 (胸径、树高和冠幅) 和径向生长速率等综合特征差异的研究还不足^[1], 有待于进一步揭示和研究。

急尖长苞冷杉 (*Abies georgei* var. *smithii*) 作为藏东南地区建群种分布广泛, 海拔分布跨度大、树龄长, 是树木径向生长响应气候变化研究的理想对象。为探究不同坡向、海拔急尖长苞冷杉径向生长规律, 本研究以西藏色季拉山急尖长苞冷杉为研究对象, 使用生长锥采集不同坡向、不同海拔急尖长苞冷杉树芯作为研究样本, 研究色季拉山不同坡向、不同海拔急尖长苞冷杉径向生长特性。这对分析气候变化背景下, 高原高海拔地区不同坡向、不同海拔急尖长苞冷杉径向生长差异及驱动因子有重要意义, 同时为色季拉山急尖长苞冷杉径向生长研究积累基础数据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

藏东南林芝境内的色季拉山属念青唐古拉山脉, 山脉大致走向由西北向东南延伸, 平均海拔3 000 m以上, 为典型的亚高山寒温带半湿润气候。植被从高海拔到低海拔分布有高寒草甸、高山寒带灌丛、亚高山寒温带暗针叶林、松林、落叶阔叶林和山地温带针阔混交林。研究区内主要由急尖长苞冷杉、高山松 (*Pinus densata*) 等组成的暖温性针叶林。色季拉山常年受印度洋季风影响, 年平均气温为-0.73 °C, 月平均最低温出现在每年1月, 为-13.80 °C, 月平均最高气温出现在每年7月, 为9.80 °C, 年降水量为1 134 mm, 降水量主要集中在5-9月^[5,6]。

本文以色季拉山建群树种急尖长苞冷杉为研究对象。急尖长苞冷杉是松科冷杉属植物, 分布于中国云南西北部、四川西南部及西藏东南部, 研究区内急尖长苞冷杉分布海拔范围是3 000~4 350 m。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

本文采样点位于色季拉山急尖长苞冷杉分布区域的阴坡和阳坡, 每个坡向每隔海拔100 m设置一个调查取样地, 采用样方法调查并记录样方内急尖长苞冷杉的数量、高度、胸径、冠幅等信息。详细采样

点信息见表1。

表1 色季拉山不同坡向、不同海拔梯度采样点位汇总

Tab.1 Summary of sampling points at different altitude gradients on various slopes of Sejila Mountain

坡向	海拔/m	经度	纬度	样树个数	取树芯数
阴坡	3 707	94.7 159	29.6 422	80	160
	3 812	94.7 128	29.6 415	62	124
	3 924	94.7 103	29.6 399	100	195
	4 014	94.7 091	29.6 380	62	123
	4 110	94.7 084	29.6 360	69	135
	4 205	94.7 062	29.6 340	135	207
	4 311	94.7 057	29.6 323	48	91
	3 725	94.7 190	29.6 447	116	221
阳坡	3 812	94.7 154	29.6 457	43	82
	3 908	94.7 136	29.6 472	107	205
	4 010	94.7 124	29.6 482	48	95
	4 106	94.7 112	29.6 490	65	128
	4 203	94.7 095	29.6 496	56	111
	4 308	94.7 086	29.6 504	73	145

1.2.2 树轮的预处理

(1) 采样

本研究的采样工作于2023年8-12月首次开展,2024年9-12月补充采集缺样、损样树芯,依照国际年轮数据库(International Tree-Ring Data Bank, ITRDB)的采样标准进行采样,对研究区不同坡向、不同海拔急尖长苞冷杉1.3 m胸高处平行于等高线方向树干两侧进行样芯采样,使用生长锥型号为:北京哈维斯廷500 mm/5.15 mm,采样时生长锥钻入方向一定与树干髓芯垂直。钻入树干时应保持匀速平稳,避免晃动,取样树芯必须经过髓芯处。取样后放入PVC透明管并用软塞堵住两头,及时带回实验室进行室内阴干处理。

(2) 阴干

用树木标准年代法对树芯进行预处理,把树芯放在干燥阴凉通风高处自然晾干,不得使用暴晒、烘烤等方法人为加快晾干速率,避免干燥过快导致树芯弯曲、断裂;同时避免置于潮湿处阴干,不仅减缓阴干速率,还有可能导致树芯发霉。

(3) 粘黏

将木胶均匀的挤在定制の木槽里,用量适中,避免粘接后外溢或木胶量少粘贴不牢。晾干后的树芯平行放在带木胶的木槽里,对于断裂的木胶按照年轮缺刻进行拼接,拼接处一定压实,不能拼接的树芯直接剔除。

(4) 打磨

待木胶完全干燥后,使用平板式砂带砂盘机(AUWIN MM491GL)砂带粗糙度由小到大(400目~600目~800目~1 000目)顺序逐级打磨,直到能看清年轮边界为止。

(5) 扫描

使用维山VF3120高速平板扫描仪进行树芯扫描,扫描分辨率设置为1 200 dpi,使用万深LA-S年轮分析测量仪通过设置辅助线、倾斜角、精细、吸附、差分宽度等参数对每根树芯进行逐个年轮宽度的精细测量,测量精度可达0.0 001 mm。

1.2.3 统计分析方法

根据胸径大小对色季拉山急尖长苞冷杉划分为4个等级:

小树:胸径 ≤ 20 cm;中树:20 cm $<$ 胸径 ≤ 40 cm;大树:40 $<$ 胸径 ≤ 60 cm;古树:胸径 > 60 cm。

基于2023-2024年样地调查数据,不同坡向、不同海拔上的胸径 > 5 cm的急尖长苞冷杉胸径经检验符合正态分布规律,用独立样本t检验法分析不同坡向、不同海拔急尖长苞冷杉的形态特征(胸径)差异。为了分析急尖长苞冷杉种群各个径级在不同坡向、不同海拔上的差异,统计各个坡向、各个海拔不同径级的数量,并分别统计各个对象在各个样地的数量占比,并用卡方检验比较这些占比在坡向上的差异。使用Microsoft office Excel 2016软件处理数据并作图。

2 结果和分析

2.1 不同坡向急尖长苞冷杉密度随海拔变化特征

由图1中可以看出,色季拉山阳坡、阴坡急尖长苞冷杉种群密度随海拔升高表现出大致一致的规律,即随着海拔的升高,种群密度逐渐变小,至海拔4 000 m时达到最小,阳坡、阴坡密度分别为202.04 \cdot 株 \cdot hm $^{-2}$ 、269.7 \cdot 株 \cdot hm $^{-2}$,之后随着海拔的升高种群密度升高,至海拔4 200 m达到最大值,阳坡、阴坡密度为452.38 \cdot 株 \cdot hm $^{-2}$ 、635.95 \cdot 株 \cdot hm $^{-2}$,最后随海拔升高至4 300 m而再次变小。色季拉山急尖长苞冷杉种群密度最高点出现在阴坡海拔4 200 m处,而种群密度最低点出现阴坡海拔4 300 m处,该海拔区域大致是色季拉山阴坡林线的位置。有研究表明色季拉山林线杜鹃花属灌木密度大、盖度高是限制色季拉山林线树种急尖长苞冷杉种群更新及林线上移的主要因素,可能也是导致阴坡4 300 m处急尖长苞冷杉种群密度最低的原因之一^[7]。

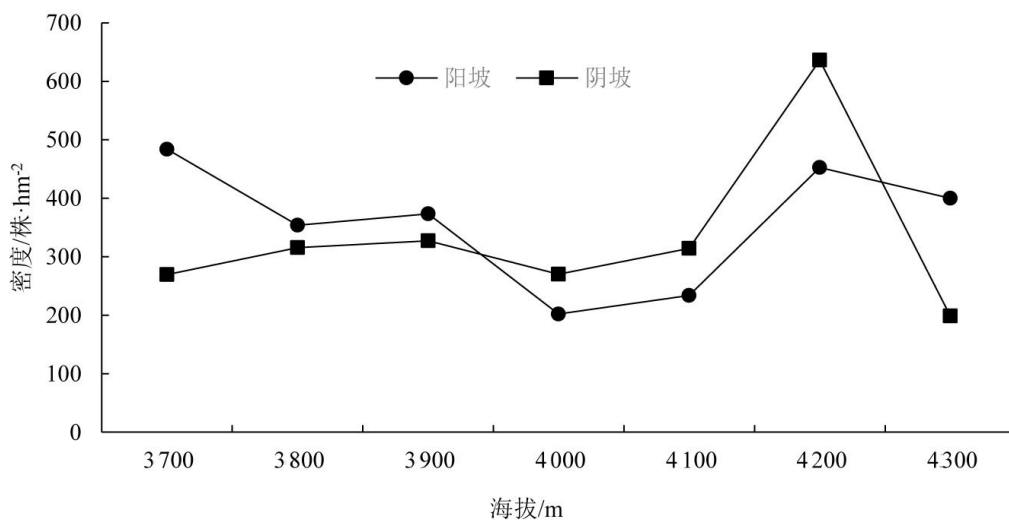


图1 不同坡向急尖长苞冷杉种群密度随海拔变化

Fig.1 Variation of *Abies georgei* var. *smithii* population density with altitude on different slopes

2.2 不同坡向急尖长苞冷杉径级特征研究

2.2.1 不同坡向急尖长苞冷杉径级结构比较

色季拉山急尖长苞冷杉种群内径级分布占比最高的是小树，其在阳坡、阴坡占比均为最高，分别为 46.85%（238 株）和 41.91%（233 株），阳坡和阴坡的小树密度分别为 191.91 株·hm⁻²和 136.86 株·hm⁻²；中树占比次之，阳坡和阴坡分别为 32.09%（163 株）和 36.87%（205 株），中树在各坡向的密度分别为 110.89 株·hm⁻²和 120.41 株·hm⁻²，阳坡、阴坡的古树径级占比最少，其在各坡向占比分别为 8.27%（42 株）和 4.68%（26 株）。阳坡、阴坡不同径级急尖长苞冷杉个体数量随着径级的变大逐渐减少，整体而言，色季拉山急尖长苞冷杉种群年龄结构呈现为稳定型种群。

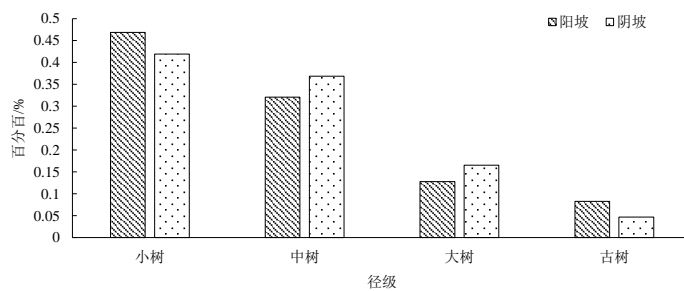


图 2 不同坡向急尖长苞冷杉径级结构

Fig.2 Diameter class structure of *Abies georgei* var. *smithii* on different slopes

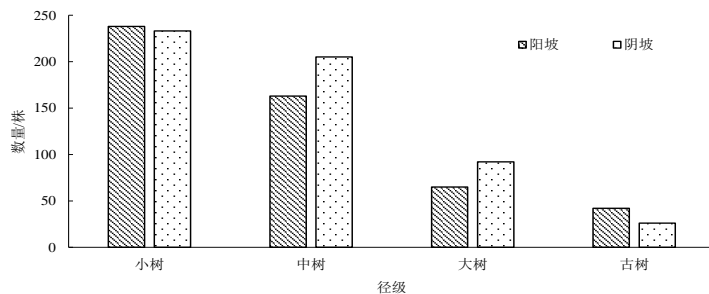


图 3 不同坡向急尖长苞冷杉径级数量特征

Fig.3 Quantitative characteristics of diameter classes for *Abies georgei* var. *smithii* on different slopes

阳坡的小树、古树占比显著大于阴坡 ($p < 0.05$)，而阴坡的中树、大树占比显著大于阳坡 ($p < 0.01$)，阳坡相对于阴坡呈现为增长型种群结构，阴坡相对于阳坡则呈现为衰退型种群结构。

2.2.2 不同坡向各海拔急尖长苞冷杉径级组成特征

由图 4 可见，色季拉山急尖长苞冷杉种群阳坡、阴坡随海拔升高，各海拔内径级占比表现出不同的特征：阴坡急尖长苞冷杉随着海拔的升高，小树、中树比例逐渐增加，古树、大树随着海拔的升高比例逐渐减小，古树在海拔 4 000 m 后最先消失，大树在海拔 4 200 m 后消失。阳坡急尖长苞冷杉随着海拔的升高，小树占比表现为先减小后增加的趋势，占比最小处出现在阳 4 100 m，中树占比呈现为逐渐增加的趋势，大树占比随海拔波动变化较大，呈现两次先增大后减小的波动，古树则呈现先增大，至海拔 4 000 m

处达到最大，而后减小的变化过程。

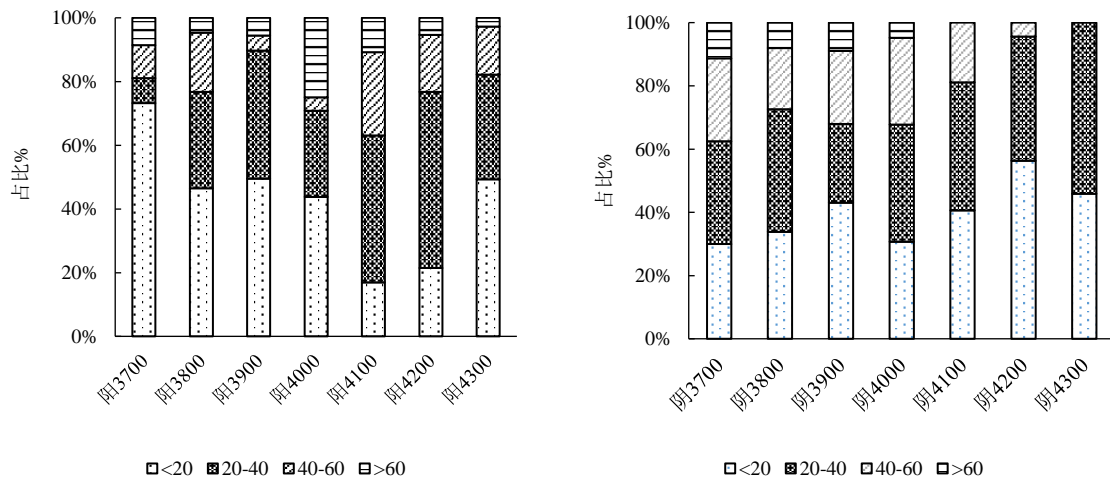


图4 不同坡向各海拔急尖长苞冷杉径级组成

Fig.4 Size class composition of *Abies georgei* var. *smithii* across altitudes on different slopes

2.3 不同坡向急尖长苞冷杉形态大小比较

由图5可见，色季拉山阳坡、阴坡急尖长苞冷杉平均胸径随海拔升高呈现出不同的变化规律：随着海拔的升高，阴坡急尖长苞冷杉平均胸径整体表现为逐渐减小的趋势，在海拔4 000 m处波动上升，至海拔4 300 m处降至最小值，为20.38 cm；急尖长苞冷杉平均胸径随着海拔的升高而增加，至海拔4 000 m处达到最大值，为36.86 cm，海拔4 000~4 100 m为平台峰值，平均胸径维持在36.90 cm左右；之后随着海拔的升高而降低，至海拔4 300 m处降至24.48 cm。

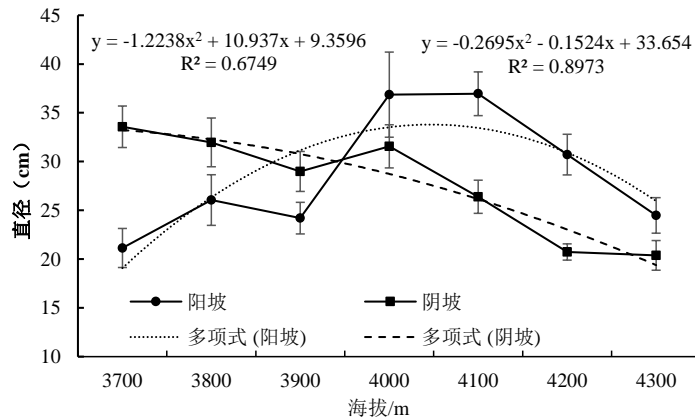


图5 不同坡向急尖长苞冷杉平均胸径随海拔变化

Fig. 5 Variation of mean DBH of *Abies georgei* var. *smithii* with altitude on different slopes

由表2可见，在海拔3 700~3 900 m内，阴坡急尖长苞冷杉的平均胸径大于阳坡，但在海拔3 900~4 300 m范围内，阳坡急尖长苞冷杉平均胸径阳坡大于阴坡。阳坡古树的平均胸径(76.71 ± 12.42) cm显著大于阴坡(69.46 ± 15.27) cm ($p < 0.05$)，阳坡和阴坡小树的胸径分别为(11.33 ± 2.75) cm、(12.26 ± 2.84) cm，差异不显著 ($p > 0.05$)。

表2 不同坡向急尖长苞冷杉的生长特性

Tab. 2 Growth characteristics of *Abies georgei* var. *smithii* on different slopes

生长特性	检验方法	阳坡	阴坡	P值
小树占比/%	卡方检验	45.85	41.91	0.02
小树胸径/%	独立样本t检验	11.33±2.75	12.26±2.84	0.11
古树占比/%	卡方检验	8.27	4.68	0.01
古树胸径/%	独立样本t检验	76.71±12.42	69.46±15.27	0.03

注：P < 0.05 表示显著差异，P < 0.01 表示极显著差异。

2.4 不同坡向急尖长苞冷杉径向生长速率比较

2.4.1 不同坡向急尖长苞冷杉总体生长速率

由图6可见，色季拉山阳坡与阴坡急尖长苞冷杉树木径向生长速率差异较大，阳坡急尖长苞冷杉径向生长速率 (2.57 ± 0.54) mm/a 显著大于阴坡生长速率 (0.95 ± 0.07) mm/a，差异显著 (p < 0.01)，阳坡急尖长苞冷杉平均径向生长速率是阴坡的2.71倍。

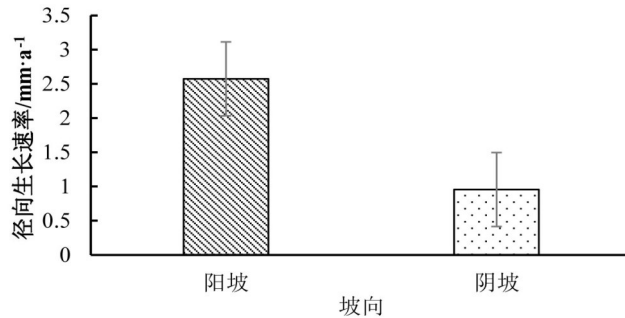


图6 不同坡向急尖长苞冷杉生长速率变化

Fig. 6 Growth rate variation of *Abies georgei* var. *smithii* on different slopes

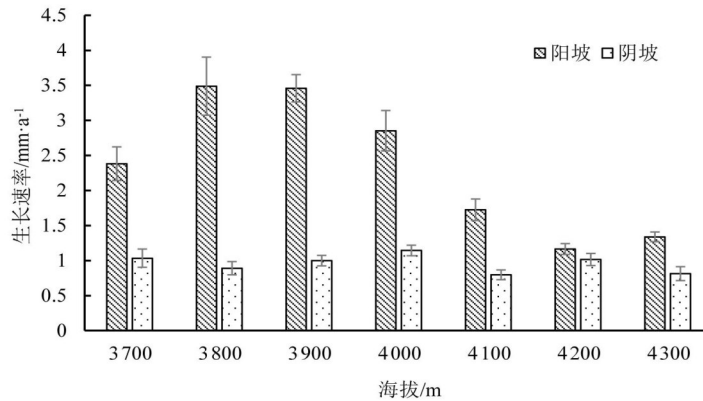


图7 不同海拔急尖长苞冷杉生长速率变化

Fig.7 Variation in growth rate of *Abies georgei* var. *smithii* with altitude

2.4.2 不同海拔急尖长苞冷杉生长速率

由图7可见，同等海拔水平范围内，阳坡急尖长苞冷杉径向生长速度均大于阴坡。阴坡急尖长苞冷杉径向生长速率随海拔升高整体变化不大，径向生长速率介于 (0.79 ± 0.07) ~ (1.14 ± 0.05) mm/a 之间；阳坡急尖长苞冷杉径向生长速率随海拔升高呈现为先增大后减小的趋势，其中在海拔3 800 m和3 900 m

处生长速率达到最大,处于 $(3.45 \pm 1.00) \sim (3.48 \pm 0.89)$ mm/a之间,海拔3 900 m后开始减小,至海拔4 200 m处降至最小值为 (1.16 ± 1.01) mm/a,之后有小幅波动上升。阳坡海拔3 800~3 900 m处急尖长苞冷杉径向生长速率在全区域内最高,说明阳坡海拔3 800~3 900 m可能是急尖长苞冷杉适宜生长分布的区域。

2.5 不同径级急尖长苞冷杉生长速率

由图8可见,同等径级的急尖长苞冷杉于阳坡的径向生长速率总是大于阴坡。不同径级两个坡向之间生长速率差异明显($P < 0.05$)。阳坡急尖长苞冷杉径向生长速率随着径级的增大逐渐增大,中树的生长速率最大,为 (2.79 ± 0.35) mm/a,随着径级的继续增大,生长速率逐渐减小,到达古树径级时减小至 (1.50 ± 0.29) mm/a;阴坡急尖长苞冷杉径向生长速率随着径级的增大而缓慢增大,至大树径级达到最大值,为 (1.15 ± 0.08) mm/a,之后随着径级的增大而缓慢下降,阴坡急尖长苞冷杉在径级小树、古树两个层级生长速率最小,分别为 (0.95 ± 0.08) mm/a、 (0.86 ± 0.12) mm/a。阳坡急尖长苞冷杉古树径级的生长速率在阳坡各径级中最小,但仍大于阴坡各径级生长速率的最大值,表明相对于阴坡,阳坡更适于急尖长苞冷杉的径向生长。

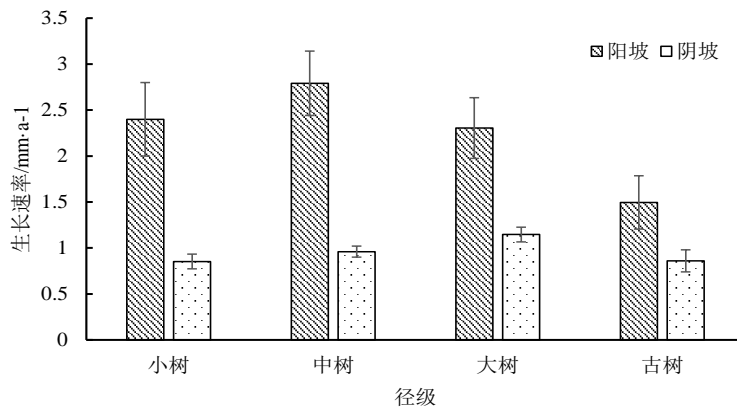


图8 不同径级急尖长苞冷杉生长速率研究

Fig.8 Growth rate of *Abies georgei* var. *smithii* across size classes

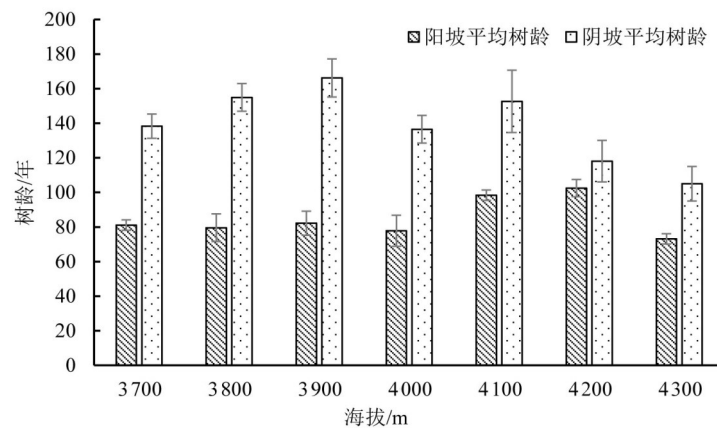


图9 不同坡向急尖长苞冷杉平均树龄随海拔变化特征

Fig. 9 Variation of mean tree age of *Abies georgei* var. *smithii* with altitude on different slopes

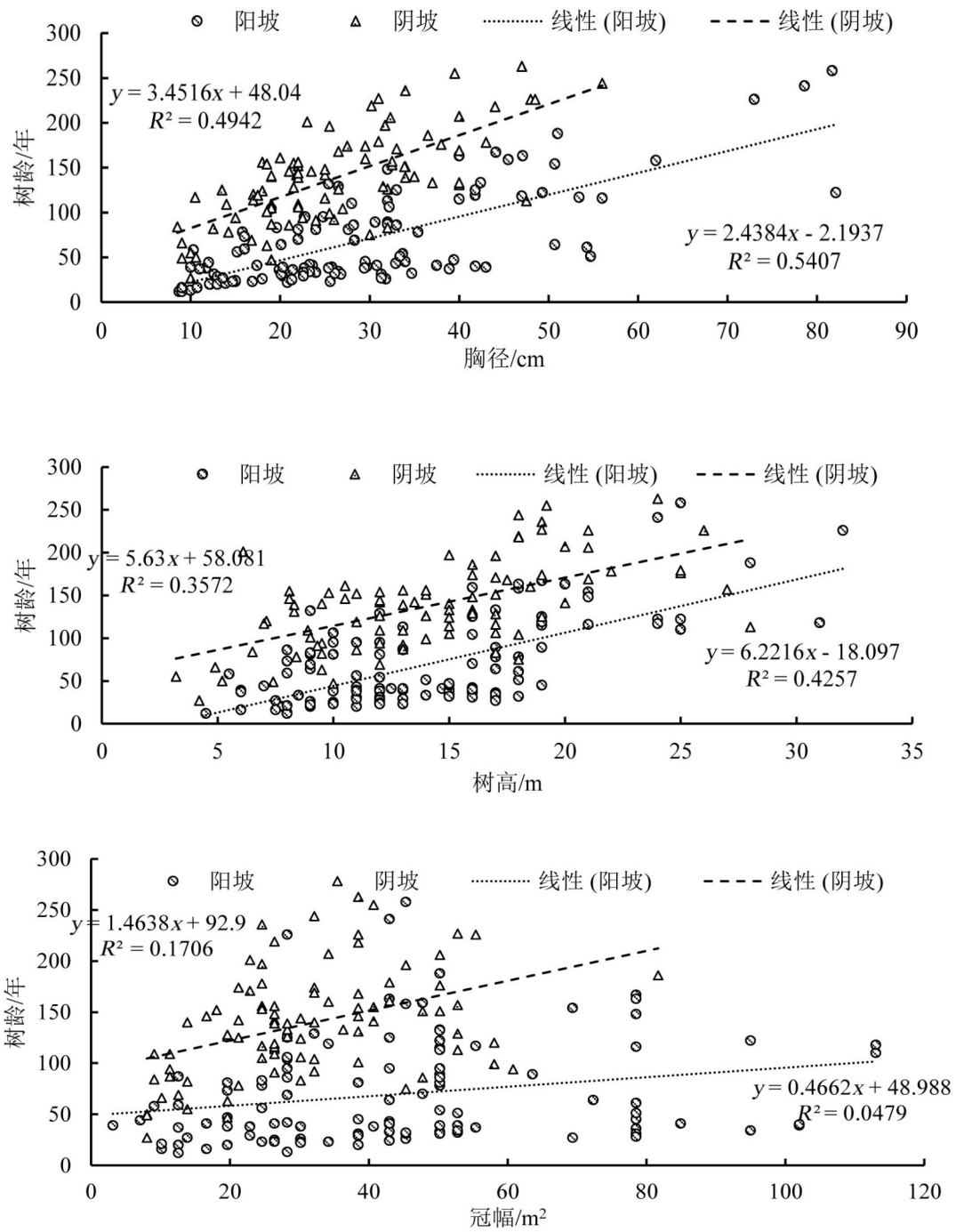


图 10 不同坡向急尖长苞冷杉胸径、树高、冠幅和树龄的回归分析
 Fig.10 Regression analysis of DBH, tree height, crown width, and tree age of *Abies georgei* var. *smithii* on different slopes

2.6 急尖长苞冷杉生长指标与年龄的回归分析

色季拉山不同坡向急尖长苞冷杉平均树龄差异明显，阴坡急尖长苞冷杉平均树轮 (138.80 ± 17.65) 年显著大于阳坡 (84.92 ± 8.12) 年。由图9中可以看出，不同坡向急尖长苞冷杉平均树龄随海拔变化趋势

略有差异：阳坡急尖长苞冷杉平均树龄在低海拔范围内（3 700~4 000 m）随着海拔的增加趋于稳定，维持在 $(79.57 \pm 8.01) \sim (82.14 \pm 7.03)$ 年，之后缓慢增大，至海拔4 200 m达到最大平均树龄 (102.45 ± 5.24) 年，随后开始下降；阴坡急尖长苞冷杉各海拔平均树龄随海拔升高整体呈现为先增大后减小的趋势，其中在海拔3 900 m处平均树龄达到最大，为 (166.16 ± 11.14) 年，海拔4 300 m处平均树龄最小，为 (105.00 ± 10.02) 年。阳坡整体及各海拔平均树龄显著低于阴坡，这是由于阳坡小树数量偏多所致。

对色季拉山不同坡向急尖长苞冷杉个体胸径、树高、冠幅和树龄做回归分析，得到急尖长苞冷杉树芯取样处年龄与对应生长指标的拟合方程。从图10中可以看出，阴坡的胸径、树高、冠幅与树龄的拟合曲线均处于阳坡之上，表明当长到相同胸径时阴坡所需时间要长于阳坡（胸径拟合斜率：阴坡 $3.4\ 515 >$ 阳坡 $2.4\ 384$ ；树高拟合斜率：阴坡 $5.63 <$ 阳坡 $6.2\ 216$ ；冠幅拟合斜率：阴坡 $1.4\ 638 >$ 阳坡 $0.4\ 662$ ），亦可以理解为生长相同的时间阳坡达到的生长指标要高于阴坡，间接地证明了阳坡急尖长苞冷杉的生长速率高于阴坡，这与前述研究结果相一致。

3 结论和讨论

3.1 结论

本研究揭示了色季拉山坡向与海拔梯度对急尖长苞冷杉种群结构与生长特征的显著影响。主要结论如下：（1）种群密度：阴坡的种群密度整体高于阳坡。在海拔梯度上，两个坡向的密度均呈现先减小、后增大、再减小的单峰分布格局；（2）种群年龄结构与径级分布：该种群年龄结构整体呈稳定型。然而，坡向间存在显著差异：阳坡的小树与古树个体数量及比例高于阴坡，而阴坡的中树与大树占优。随海拔升高，阴坡的大径级个体（古树、大树）逐渐消失，小径级个体（小树、中树）比例随之上升；在阳坡，小树比例随海拔呈“V”型变化（先减小后增加），而其他径级个体比例则表现为先增加后减小的趋势；（3）形态特征的海拔响应：树高与冠幅在两个坡向上均随海拔升高而递减。平均胸径的响应模式因坡向而异：在阳坡，平均胸径随海拔升高呈先增加后减小的单峰趋势；而在阴坡，则表现为持续的递减趋势；（4）径向生长速率：阳坡个体的平均径向生长速率是阴坡的2.71倍。在所有可比海拔与径级中，阳坡的生长速率均显著大于阴坡。随海拔升高，阳坡的生长速率呈先增加后减小的单峰曲线，而阴坡的生长速率变化则不显著；（5）生长关系拟合：基于胸径、树高和冠幅的线性回归分析均一致表明，在任一给定形态指标下，阳坡急尖长苞冷杉的生长速率均系统性地高于阴坡。

3.2 讨论

本研究中阳坡急尖长苞冷杉小树数量占比（46.85%）显著大于阴坡（41.91%）（ $P < 0.05$ ），阳坡急尖长苞冷杉小树个体密度（ $191.91 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）也大于阴坡（ $136.86 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）。类似地在四川西部亚高山地区均发现阳坡小径级冷杉属个体的数量要比阴坡多^[1]，玻利维亚不同坡向树种更新动态研究也表明，阳坡光照、温度条件显著好于阴坡，导致阳坡小树数量明显多于阴坡^[8]。本研究中，阳坡的光照、温度等条件明显好于阴坡，为小树存活和生长提供了更好的环境条件，这可能是阳坡急尖长苞冷杉小树占比显著高于阴坡的原因。相对阴坡，阳坡较好的热量、温度条件可以适度减弱高寒对种子萌发、幼苗生长的影响，可能更利于种子的萌发及幼苗的存活、成长，顺利长成小树。尽管管树木生长最低温度限制阈值没有一个确切的温度，不同植物物种的低温阈值可能也不同，但是热量限制仍然被广大学者默认为是限制高海

拔地区植物生长及分布的主要限制因子^[9]。研究表明,高海拔地区的低温环境对幼苗的存活和生长具有限制的抑制作用^[1]。Körner等^[10]研究表明高海拔地区环境温度低于植物生长所需要最低温度时,植物会由于热量不足而生长受限;程伟等^[11]研究发现,高海拔地区岷江冷杉死亡率最高的阶段是幼苗阶段,低温对幼苗阶段岷江冷杉威胁最大。以上研究结果表明,阳坡相对于阴坡具有更适宜的光照、温度条件,更适宜急尖长苞冷杉种群的更新。

本研究中,色季拉山阳坡的急尖长苞冷杉平均胸径和径向生长速率均大于阴坡。阳坡的光照、温度条件等相对于阴坡更好,这对促进阳坡急尖长苞冷杉的径向生长起到一定的积极作用。国内外研究结果显示,加拿大圣伊莱亚斯山阳坡白芸杉的平均胸径显著大于阴坡,造成这种现状的主要原因是阴坡土壤冰冻程度显著高于阳坡,于非生长季显著抑制了白云杉的径向生长^[12]; Lopez等^[13]利用寒区水文建模平台(CRHM)在比利牛斯山不同坡向模拟积雪对气候变暖的响应,结果表明阳坡由于光照强于阴坡,导致阳坡积雪时间短于阴坡,直接延长了阳坡树种的生长期限。郭滨德^[4]对川西高原岷江冷杉生长速度对积温的响应研究结果表明,增温明显的促进了岷江冷杉的径向生长速率。亦有研究表明,光照和气温对进行生长速率的影响亦有抑制作用。Liang等^[7]在青藏高原东北部进行的地形对祁连圆柏和青海云杉生长影响研究表明,光照条件较差的东坡的两个树种的径向生长速率反而比光照条件更好的西坡生长快,主要原因是西坡日照强度大,地表水分蒸发量大,小生境更干燥,此时土壤水分成为限制两个树种生长的主要环境因子。郭滨德等^[4]在川西高原不同坡向树种对快速升温的研究表明,阴坡紫果冷杉的平均年轮宽度显著高于阴坡。在降水量丰富的阳坡地区,阳坡树种的径向生长速率可能大于阴坡,但在一些干旱、半干旱地区,阳坡强光照加速土壤水分增发,进一步限制树木径向生长速率。因此,在干旱、半干旱地区除了温度因子外,水分可能是限制树木径向生长的又一重要因子,亦有可能是首要限制因子,这种推测有待进一步验证。在藏东南色季拉山区域,阳坡急尖长苞冷杉的径向生长速率比阴坡快,小树数量、比例更高,未来有必要加强对各坡向、各海拔气象因子的监测,从不同坡向和海拔的温度、太阳辐射强度、土壤含水量、空气湿度等环境因子入手,以深入探究不同坡向、海拔影响急尖长苞冷杉径向生长速率差异的环境生态学机制。

参考文献:

- [1] 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(02):92-99.
- [2] 王晓东,刘惠清.长白山北坡林线岳桦种群动态对气候变化响应的坡向分异[J].地理科学,2012,32(2):199-206.
- [3] Shen W, Zhang L, Liu X S, et al. Seed-based treeline seedlings are vulnerable to freezing events in the early growing season under a warmer climate: evidence from a reciprocal transplant experiment in the Sergyemla Mountains, southeast Tibet[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 187: 83-92.
- [4] 姚慧芳,屈兴乐,卢杰,等.藏东南3种典型针叶林林木竞争强度研究[J].高原农业,2023,7(04):409-417
- [5] 马和平,东主.西藏色季拉山北坡表层土壤有机碳垂直分布特征研究[J].高原农业,2020,4(02):115-122.
- [6] 蔡苗,扎西旺拉,刘方林,等.色季拉山高山松树木生长对气候的敏感性随个体和时间变化[J].高原农业,2025,9(01):25-35+140.
- [7] Liang E Y, Shao X M, Eckstein D, et al. Topography- and species-dependent growth responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 236(2/3): 268-277.