

文章编号: 1671-9352(2024)01-0132-07 DOI: 10.6040/j.issn.1671-9352.0.2023.216

山东省不同海拔区域常见树种树高、胸径及其生长关系的差异

张文馨¹, 李强², 王宁³, 范小莉¹, 王蕙³, 姜成平⁴, 梁玉^{1*}

(1. 山东省林业科学研究院, 山东 济南 250014; 2. 海南医学院热带医学院, 海南 海口 571199; 3. 山东大学生命科学学院, 山东 青岛 266237; 4. 烟台市森林资源监测保护服务中心, 山东 烟台 264001)

摘要: 利用山东植物群落清查数据, 选取山东常见树种为研究对象, 分析其树高、胸径特征, 采用单因素方差分析法比较树高、胸径在不同海拔区域是否存在显著差异, 采用标准化主轴估计法研究不同海拔区域不同树种树高和胸径异速生长关系。研究发现, 不同海拔区域间树木的树高、胸径及其生长关系存在显著差异, 不同海拔区域各树种采取的异速生长模式有所差异。麻栎、刺楸、栓皮栎这3种阔叶树种在不同海拔区域树高-胸径生长关系均呈现异速生长模式, 胸径的生长速率大于树高的生长速率。侧柏在低海拔区域胸径的生长速率大于树高的生长速率, 而在中海拔区域树高的生长速率大于胸径的生长速率。油松在低海拔区域树高的生长速率较快, 而在中海拔和高海拔区域胸径的生长速率较快。赤松和日本落叶松分别在中海拔和中海拔区域采取等速生长模式, 在其他海拔区域采取异速生长模式, 胸径的生长速率大于树高的生长速率。海拔带来的环境变化能够影响树木的生长过程, 但不同树种生长的响应差异是其所处生境和物种遗传特性共同作用的结果。

关键词: 树高; 胸径; 异速生长; 海拔

中图分类号: Q948 **文献标志码:** A

引用格式: 张文馨, 李强, 王宁, 等. 山东省不同海拔区域常见树种树高、胸径及其生长关系的差异[J]. 山东大学学报(理学版), 2024, 59(1): 132-138.

Differences in height, diameter at breast height, and growth relationships between them of common tree species at different altitudes in Shandong Province

ZHANG Wenxin¹, LI Qiang², WANG Ning³, FAN Xiaoli¹, WANG Hui³, JIANG Chengping⁴, LIANG Yu^{1*}

(1. Shandong Academy of Forestry, Jinan 250014, Shandong, China; 2. School of Tropical Medicine of Hainan Medical University, Haikou 571199, Hainan, China; 3. School of Life Sciences of Shandong University, Qingdao 266237, Shandong, China; 4. Yantai Forest Resources Monitoring and Protection Service Center, Yantai 264001, Shandong, China)

Abstract: Based on the data of plant community inventory in Shandong Province, the common tree species were selected as the research objects to analyze the characteristics of diameter at breast height (DBH) and tree height. Single factor analysis of variance was used to compare whether DBH and tree height were significantly different at different altitudes. The allometric growth relationship between tree height and DBH of different tree species at different altitudes was studied by standardized major axis estimation. The study found that there were significant differences in DBH, tree height and their growth relationship at different altitudes, and height-DBH allometry of different tree species at different altitudes was different. The height-DBH growth relationship of three broad-leaved tree species, *Quercus acutissima*, *Robinia pseudoacacia* and *Quercus variabilis*, shows allometry growth at different altitudes, and the growth rate of DBH is greater than that of tree height. At low altitude, the growth rate of DBH of *Platycladus orientalis* was higher than that of tree height, while at middle altitude, the growth rate of tree height was higher than that of DBH. For *Pinus tabulaeformis*, the growth rate of tree height is faster at low altitude areas, while the growth rate of DBH is faster in middle and high altitude areas. *Pinus densiflora* and *Larix kaempferi* have adopted isokinetic growth patterns in high and medium altitude areas. The environmental changes caused by altitude gradients can affect the growth process of trees, but the differences in growth response of different tree species are the result of the combined effects of habitat and genetic characteristics.

Key words: tree height; diameter at breast height; allometry; altitude

收稿日期: 2023-05-12; 网络出版时间: 2023-10-17 10:00:15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/37.1389.N.20231016.0914.002>

基金项目: 国家科技基础性工作专项项目资助(2011FY110300); 白榆白蜡森林认证资助项目(SCSFP-RZ-1); 核桃森林认证资助项目(SCSFP-RZ-2)

第一作者简介: 张文馨(1989—), 女, 高级工程师, 博士, 研究方向为生态学. E-mail: zhangwenxin_508@163.com

* 通信作者简介: 梁玉(1979—), 女, 研究员, 博士, 研究方向为生态学. E-mail: liangyu_79@163.com

0 引言

植物的生长包括径向和垂直两方面,两者关系密切。树木胸径生长与机械支持、水分吸收及生物量相关,树高生长与垂直方向上接受阳光的能力相关,它们综合反映了植物的光合同化能力^[1]。异速生长用于描述生物体大小和其他属性之间的非线性关系,或表示生物体不同属性随生长所发生的变化规律,通常以幂指数 $y = bx^a$ 或对数形式 $\lg(y) = \lg(b) + a \lg(x)$ ^[2]。树高-胸径的异速生长关系可以反映植物径向与轴向生长的权衡,是植物在特定环境下生存策略的表现^[3]。

植物的形态特征除了受到物种本身生物学特性的限制外,还受到物种所处生境条件的影响。一些研究已经证实,气候、光照、竞争等生境因素与树木异速生长变化密切相关。Qiu 等^[4]研究了美国西部 7 个州 4 034 个样地黄松的树高-胸径异速生长变化,发现其异速生长变化与生长环境差异有关,邻近树种间的竞争促使黄松在高度生长上投入更多,而在干旱和寒冷条件下,黄松相对较矮。Zhang 等^[5]估算了中国南方杉木的树高-胸径异速生长,发现温度是影响异速生长关系的关键因素。李利平等^[6]研究发现新疆山区针叶林胸径-树高异速生长主要受水分的影响。

海拔作为一种重要的地形要素,控制着环境因子的组合与变异,直接或间接地影响植物的生长。在不同的海拔梯度上,气温、降水和光照等环境因子发生着变化,研究不同海拔不同树种的胸径-树高生长规律,对于了解植物在不同生境中的适应策略、揭示植物对全球气候变化的响应机制具有重要意义。

本研究基于山东省森林植物群落的全面调查,分析山东省不同海拔区域常见树种的树高、胸径及其生长关系的差异,以期研究不同树种树高-胸径的异速生长关系及其对环境变化的响应。

1 研究方法

1.1 研究地概况

山东省是我国 10 个沿海省份之一,地处黄河下游,介于北纬 $34^{\circ}25'$ — $38^{\circ}23'$ 、东经 $114^{\circ}36'$ — $122^{\circ}43'$ 之间,位于北半球中纬度地带。山东省属于暖温带半湿润季风气候区,四季分明,夏季受来自太平洋、赤道的湿气流的影响,盛行湿热的东南风,雨热同季;冬季受西伯利亚、蒙古冷高压的影响,盛行寒冷干燥的西北风,寒冷干燥。全省年平均气温 $11 \sim 14^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $550 \sim 950 \text{ mm}$ 。全省地貌由山地丘陵和平原组成,境内少数山地海拔超过 $1\ 000 \text{ m}$,大部分山地丘陵海拔在 $200 \sim 500 \text{ m}$ 。山东省位于我国东部暖温带落叶阔叶林区,省域内主要的针叶林类型有赤松林、油松林、侧柏林、黑松林、落叶松林等,阔叶林类型有麻栎林、刺槐林、栓皮栎林等^[7]。

1.2 植物群落调查

结合植被图和相关历史资料,运用统一的方法体系和技术规范对山东省植物群落进行全面系统的调查^[8],山地沿海拔梯度进行调查,样地尽可能覆盖山东省所有典型的自然植物群落类型。在每个样地内设置 $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的长方形样方,测量记录所有乔木的物种名、树高和胸径,同时用手持 GPS (Garmin 621SC, 中国台湾国际航电股份有限公司) 记录样地经纬度和海拔。对各样地中的乔木进行筛选,得到个体数较多的常见树种 7 种:侧柏 (*Platycladus orientalis*)、赤松 (*Pinus densiflora*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、日本落叶松 (*Larix kaempferi*)、麻栎 (*Quercus acutissima*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、栓皮栎 (*Quercus variabilis*), 共计 21 592 对树高-胸径数据。

1.3 数据分析

将海拔划分为低海拔 ($< 500 \text{ m}$)、中海拔 ($500 \sim 1\ 000 \text{ m}$)、高海拔 ($> 1\ 000 \text{ m}$) 3 个梯度,统计分析不同海拔梯度侧柏、赤松、油松、日本落叶松、麻栎、刺槐、栓皮栎这 7 种山东常见树种的树高、胸径数据。

本研究线性拟合的主要目的是研究个体径向与纵向生长间的关系,并不是用以变量预测,因此数据分析采用标准化主轴估计 (standardized major axis estimation, SMA) 方法^[9]。垂直树高与径向胸径的关系用方程 $y = bx^a$ 来描述,线性转换成 $\lg(y) = \lg(b) + a \lg(x)$,其中 y 和 x 分别表示树高和直径, b 表示二者关系的截距, a 为斜率,也就是相对生长的指数 ($a = 1$ 时为等速生长, a 大于或小于 1 时为异速生长)^[10]。对所有树种

的树高、胸径数据进行以 10 为底的对数转换,使之符合正态分布后再进行标准化主轴估计分析。使用 R 软件中的 smatr 包实现数据分析^[11],为避免异常值对分析结果的干扰,数据分析时添加稳健估计^[12]。不同海拔梯度间的树高及胸径的比较采用单因素方差分析,该计算通过 SPSS 软件实现。

2 结果与分析

2.1 山东主要树种分布及树高、胸径特征

主要树种胸径、树高特征见表 1。侧柏是石灰岩荒山造林的先锋树种,耐贫瘠干旱,适应性较强,在山东省山区丘陵及平原地区均有分布,通常分布在海拔 900 m 以下的区域,平均树高 7.77 m,平均胸径 12.37 cm。赤松是山东省重要的针叶树种,赤松林是山东省面积最大、分布最广的天然森林群落。赤松喜湿润的气候条件,在山东省胶东丘陵区分布极为广泛,自山底至山顶均有生长,平均树高 5.97 m,平均胸径 11.91 cm。油松广泛分布于山东省的各大山地丘陵中,油松比赤松更为耐寒和耐旱,主要分布于鲁中南丘陵区,山东海拔 1 300 m 以下的区域均有分布,平均树高 6.32 m,平均胸径 13.26 cm。日本落叶松原产于日本,首先引入栽培在崂山,现崂山、罗山、昆崮山、蒙山、徂徕山等地均有分布,在山东海拔 700 m 以上区域长势较好,平均树高 12.80 m,平均胸径 19.34 cm。麻栎是山东省栎林中最主要的树种,广泛分布于胶东和鲁中南山地丘陵的棕壤和平原的褐土化潮土,垂直海拔分布可达一千多米,平均树高 7.38 m,平均胸径 12.28 cm。刺槐是原产于北美温带的植物,于 19 世纪末由欧洲引入青岛,由于其生长迅速、抗逆性强,因此被大量用于植树造林,很快发展到山东省各地及我国其他地区,在山东省各大山区丘陵及平原地区均有分布,从山底到海拔一千多米均有分布,平均树高 7.92 m,平均胸径 11.75 cm。栓皮栎为山东省境内主要的阔叶树种之一,适应性较强,较为耐旱,在鲁中南山地丘陵区与胶东丘陵区均有分布,分布的海拔高度通常在 900 m 以下,平均树高 7.58 m,平均胸径 12.68 cm。

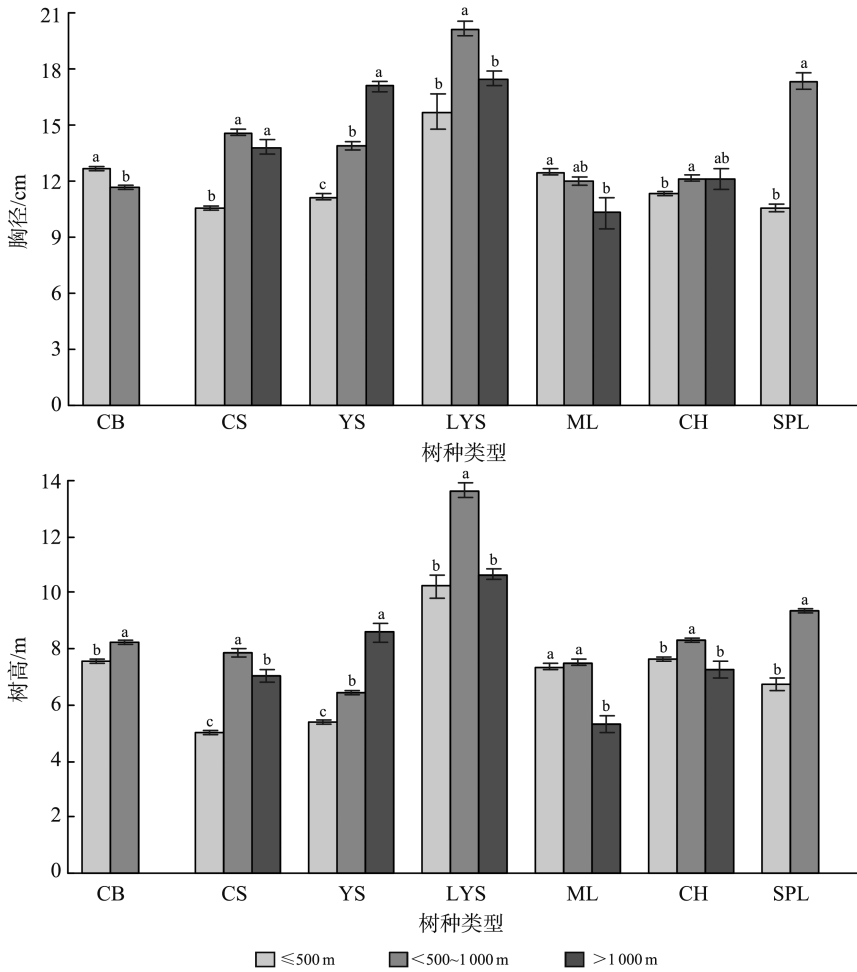
表 1 山东常见树种调查信息表

Table 1 Survey information table of common tree species in Shandong Province

树种	调查个体数	海拔/m	平均树高/m
侧柏	2 888	31~841	7.77±0.05
赤松	4 120	62~1 058	5.97±0.05
油松	3 231	80~1 344	6.32±0.07
日本落叶松	1 010	125~1 339	12.80±0.20
麻栎	2 632	7~1 208	7.38±0.07
刺槐	6 483	0~1 162	7.92±0.04
栓皮栎	1 228	40~922	7.58±0.10

2.2 不同海拔各树种胸径和树高的生长规律

各树种单因素方差分析结果见图 1。侧柏的胸径和树高在各海拔区域间均存在显著差异($P<0.05$),低海拔区域侧柏胸径显著高于中海拔区域的,低海拔区域侧柏树高显著低于中海拔区域的。在低海拔区域的赤松胸径显著低于中海拔和高海拔区域的($P<0.05$),但在中海拔区域与高海拔区域间的赤松胸径并无显著差异($P=0.11$);赤松树高在各海拔区域间差异显著($P<0.05$),在中海拔区域的赤松树高最高,在低海拔区域的赤松树高最低。油松的树高及胸径在各海拔区域间均存在显著差异($P<0.05$),在高海拔区域的油松胸径与树高最大,在低海拔区域的最小。在中海拔区域的日本落叶松胸径和树高显著高于低海拔和高海拔区域的($P<0.05$),但低海拔和高海拔区域间的并无显著差异(P 值分别为 0.30、0.71)。低海拔区域的麻栎胸径显著高于高海拔区域的($P<0.05$),但在低海拔与中海拔、中海拔与高海拔间的并无显著差异(P 值分别为 0.12、0.11);低海拔区域和中海拔区域的麻栎树高均显著高于高海拔区域的($P<0.05$),低海拔区域与中海拔区域麻栎的树高并无显著差异($P=0.30$)。在低海拔区域的刺槐胸径显著低于中海拔区域的($P<0.05$),但在低海拔与高海拔区域、中海拔与高海拔区域间的并无显著差异(P 值分别为 0.25、0.95);在中海拔区域的刺槐树高显著高于低海拔和高海拔区域的,但在低海拔与高海拔区域间的并无显著差异($P=0.28$)。栓皮栎胸径和树高在各海拔区域间均存在显著差异,栓皮栎胸径和树高在低海拔区域均显著低于中海拔区域($P<0.05$)。



CB:侧柏, CS:赤松, YS:油松, LYS:日本落叶松, ML:麻栎, CH:刺槐, SPL:栓皮栎。

注:a、b、c 代表不同组间显著性差异的比较结果。两组间有相同字母,则两组间无显著差异;两组间无相同字母,则两组间存在显著差异。

图 1 不同海拔山东主要树种的胸径和树高

Fig.1 Diameter at breast height and height of main tree species at different altitudes in Shandong Province

2.3 树高-胸径异速生长关系的海拔差异性

树高-胸径异速生长关系的海拔差异性见表 2。侧柏在低海拔区域树高-胸径 SMA 斜率显著低于 1,在中海拔区域树高-胸径 SMA 斜率显著高于 1;赤松在低海拔和中海拔区域树高-胸径 SMA 斜率显著低于 1,在高海拔区域树高-胸径 SMA 斜率接近于 1;油松在低海拔区域树高-胸径 SMA 斜率显著高于 1,在中海拔和高海拔区域树高-胸径 SMA 斜率显著低于 1;日本落叶松在低海拔和高海拔区域树高-胸径 SMA 斜率显著低于 1,在中海拔区域树高-胸径 SMA 斜率接近于 1;麻栎、刺槐在低海拔、中海拔和高海拔区域 SMA 斜率均显著低于 1,栓皮栎在在低海拔和中海拔区域 SMA 斜率均显著低于 1。

表 2 山东常见树种不同海拔胸径-树高的异速生长关系

Table 2 Allometric relationship between diameter at breast height and tree height of common tree species at different altitudes in Shandong Province

树种	海拔/m	斜率	截距	斜率 下限	斜率 上限	截距 下限	截距 上限	R ²	P	异速生 长模式
侧柏	<500	0.73	0.08	0.70	0.76	0.05	0.11	0.37	<0.001	-
	500~1 000	1.23	-0.39	1.16	1.30	-0.47	-0.32	0.15	<0.001	+
	>1 000	—	—	—	—	—	—	—	—	—
赤松	<500	0.89	-0.21	0.87	0.92	-0.24	-0.18	0.42	<0.001	-
	500~1 000	0.92	-0.18	0.87	0.96	-0.23	-0.13	0.48	<0.001	-
	>1 000	1.02	-0.32	0.89	1.17	-0.48	-0.16	0.36	0.76	=

续表

树种	海拔/m	斜率	截距	斜率 下限	斜率 上限	截距 下限	截距 上限	R^2	P	异速生 长模式
油松	<500	1.20	-0.53	1.15	1.24	-0.58	-0.48	0.51	<0.001	+
	500~1 000	0.92	-0.24	0.89	0.96	-0.28	-0.20	0.32	<0.001	-
	>1 000	0.83	-0.10	0.76	0.91	-0.19	-0.01	0.38	<0.001	-
日本落 叶松	<500	0.60	0.30	0.43	0.84	0.05	0.54	0.28	<0.001	-
	500~1 000	0.98	-0.14	0.94	1.01	-0.19	-0.10	0.73	0.21	=
	>1 000	0.86	-0.04	0.78	0.95	-0.15	0.06	0.32	<0.001	-
麻栎	<500	0.89	-0.10	0.86	0.92	-0.13	-0.06	0.52	<0.001	-
	500~1 000	0.81	0.02	0.77	0.84	-0.02	0.06	0.59	<0.001	-
	>1 000	0.69	0.05	0.57	0.83	-0.08	0.17	0.60	<0.001	-
刺槐	<500	0.77	0.08	0.76	0.79	0.07	0.10	0.57	<0.001	-
	500~1 000	0.79	0.07	0.78	0.81	0.05	0.09	0.65	<0.001	-
	>1 000	0.86	-0.07	0.78	0.95	-0.16	0.02	0.74	<0.001	-
栓皮栎	<500	0.64	0.19	0.62	0.67	0.17	0.22	0.57	<0.001	-
	500~1 000	0.83	-0.05	0.77	0.90	-0.13	0.03	0.34	<0.001	-
	>1 000	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注: +表示异速生长, 树高生长速率大于胸径生长速率; -表示异速生长, 胸径生长速率大于树高生长速率; =表示等速生长, 树高生长速率等于胸径生长速率。

3 结论与讨论

在气候状况有利的生境中, 植物体可以积累更多的营养促进自身生长, 树木通常高大粗壮; 在寒冷干旱的不利生境中, 树木通常较为矮小或细弱^[13]。植物的形态可塑性是其适应异质环境的重要特征, 植物能够改变自身的结构与功能把有限的资源分配到需要的组织器官, 从而提高其竞争力以适应异质性生境^[14]。不同海拔下的温度、水分、光照、气压等环境因子均存在差异, 影响着树木的生存、生长及生理活动^[15]。不同海拔区域胸径和树高的显著性差异可能是由各海拔区域间较大的生境差异造成的, 随着海拔的升高, 温度、降水等局地气候和坡度、土壤养分等微生境的变化, 形成了不同的生长环境, 改变了植物原有的生长状态^[16-17]。不同树种的生长习性不同, 占据的生态位区间不同, 导致不同树种树高、胸径随海拔变化的规律有所差异。

本研究发现, 不同海拔区域间树木的胸径和树高存在显著差异, 除侧柏外, 树木的树高和胸径随海拔的改变呈现相似的变化趋势。赤松、日本落叶松、刺槐、栓皮栎的树高和胸径值在中海拔区域最高, 在低海拔和高海拔区域较低; 油松的胸径和树高最大值出现在高海拔区域, 随海拔的下降而减小; 麻栎的胸径和树高值在低海拔和中海拔区域较高, 在高海拔区域较低。侧柏在低海拔区域胸径较大, 树高较小, 在中海拔区域胸径较小, 树高较大。

植物构件间的异速生长是植物面对环境选择压力采取的生态权衡策略, 植物可以通过调节内部资源分配比例改变构件间异速生长关系, 形成有利于植物生长的形态结构来应对环境压力^[18]。本研究发现, 在不同海拔区域的各树种采取的异速生长模式有所差异。麻栎、刺槐、栓皮栎这3种阔叶树种在不同海拔区域的树高-胸径生长关系均呈现异速生长模式, 胸径的生长速率大于树高的生长速率。原因可能是温度和降水影响了树木的异速生长, 低温和干旱通常会抑制树高的生长, 而将更多的资源用于径向生长^[4], 阔叶树种对寒冷和干旱的忍耐通常不如针叶树种, 因此3种阔叶树种更易受到低温和干旱的影响, 呈现出胸径生长速率大于树高生长速率的异速生长模式。侧柏和油松在不同海拔区域树高-胸径生长关系均呈现异速生长模式。在低海拔区域侧柏胸径的生长速率大于树高的生长速率, 而在中海拔区域侧柏树高的生长速率大于胸径的生长速率, 原因可能是低海拔区域通常降水较少, 树木易受干旱胁迫, 侧柏将更多的资源投入到径向生长上; 因山东省侧柏林分密度普遍较高^[19], 随着海拔的上升, 降水量增加, 但中海拔区域邻近树木对光照竞

争的影响超过了干旱胁迫对树木生长的影响,所以树木将更多的资源用于垂直生长。低海拔区域的油松呈现树高生长速率大于胸径生长速率,原因可能是随着海拔高度的下降,光照强度减小,树木更倾向垂直生长以获得更好的光照条件^[20]。赤松和日本落叶松分别在中海拔和中海拔区域采取等速生长模式。赤松喜湿润的气候条件,高海拔较低海拔区域降水量高,赤松在高海拔区域不易受干旱压力的影响,呈现等速生长。日本落叶松在中海拔区域呈等速生长模式,原因可能是中海拔区域的干旱和低温压力相对于低海拔和高海拔区域的较小。

不同树种树高-胸径的生长关系应对环境选择压力表现出不同甚至是相反的反应,海拔梯度带来的气候变化能够作用于树木的生长过程,使树木呈现出相应的垂直和径向生长的差异,但这种表型可塑性对气候变化的响应因树种遗传特性、地域差异而有明显不同^[21],表明植物的形态特征受到物种本身生物学特性和物种所处环境立地条件的共同影响,海拔这一异质生境因子对树种的异速生长并不起完全的决定作用,还与其他生物、非生物环境因子有关,是生境和物种遗传特性共同作用的结果。

参考文献:

- [1] AIBA S I, KOHYAMA T. Tree species stratification in relation to allometry and demography in warm-temperate rain forest[J]. *Journal of Ecology*, 1996, 84(2):207-218.
- [2] 韩文轩,方精云. 幂指数异速生长机制模型综述[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(4):951-960.
HAN Wenxuan, FANG Jingyun. Review on the mechanism models of allometric scaling laws: 3/4 vs. 2/3 power[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(4):951-960.
- [3] MOONEY K A, HALITSCHKE R, KESSLER A. Evolutionary trade-offs in plants mediate the strength of trophic cascades [J]. *Science*, 2010, 326:1642-1644.
- [4] QIU H, LIU S, ZHANG Y, et al. Variation in height-diameter allometry of ponderosa pine along competition, climate, and species diversity gradients in the western United States[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 497(1):119477.
- [5] ZHANG X, CHHIN S, FU L, et al. Climate-sensitive tree height-diameter allometry for Chinese fir in southern China[J]. *Forestry*, 2019, 92:167-176.
- [6] 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(1):47-53.
LI Liping, ANIVAR Maimaiti, WANG Xiangping. Analysis on the relationship between DBH and tree height of coniferous forests in mountainous areas of Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2011(1):47-53.
- [7] 王仁卿,周光裕. 山东植被[M]. 济南:山东科学技术出版社,2000.
WANG Renqing, ZHOU Guangyu. *Vegetation in Shandong Province*[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2000.
- [8] 方精云,王襄平,沈泽昊,等. 植物群落清查的主要内容方法和技术规范[J]. *生物多样性*, 2009, 17(6):533-548.
FANG Jingyun, WANG Xiangping, SHEN Zehao, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6):533-548.
- [9] HARVEY P J, PAGEL M D. *The comparative method in evolutionary biology*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1991.
- [10] WARTON D I, WRIGHT I J, FALSTER D S, et al. Bivariate linefitting methods for allometry[J]. *Biological Reviews*, 2006, 81(2):259-291.
- [11] WARTON D I, DUURSMA R A, FALSTER D S, et al. SMATR 3-an R package for estimation and inference about allometric lines[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3:257-259.
- [12] TASKINEN S, WARTON D I. Robust estimation and inference for bivariate line-fitting in allometry[J]. *Biometrical Journal*, 2011, 53(4):652-672.
- [13] 陈甲瑞,王小兰. 藏东南高山松异速生长关系的海拔差异性[J]. *湖南农业科学*, 2021(2):29-32.
CHEN Jiarui, WANG Xiaolan. Altitude differences of allometric growth relationship of *Pinus Densata* in Southeast Tibet[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2021(2):29-32.
- [14] 李钰,赵成章,董小刚,等. 高寒草地狼毒枝-叶性状的坡度差异性[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(8):709-717.
LI Yu, ZHAO Chengzhang, DONG Xiaogang, et al. Twig and leaf trait differences in *Stellera chamaejasme* with slope in alpine grassland[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(8):709-717.
- [15] KRAMER K, LEINONEN I, LOUSTAU D. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: an overview[J]. *International Journal of Biometeorology*,

2000, 44(2):67-75.

- [16] 喻树龙,袁玉江,秦莉,等. 天山北坡中部不同海拔高度雪岭云杉树轮宽度气候响应对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(3):30-38.
YU Shulong, YUAN yujiang, QIN Li, et al. Tree-ring-width growth responses of *Picea schrenkiana* to climate change for different elevations in the central Tianshan Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(3):30-38.
- [17] 谭一波,申文辉,田红灯,等. 猫儿山不同海拔植物群落树木构型差异及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8):2614-2620.
TAN Yibo, SHEN Wenhui, TIAN Hongdeng, et al. Tree architecture variation of plant communities along altitude and impact factors in Maoer Mountain, Guangxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(8):2614-2620.
- [18] 朱苗苗,朱强根,李波,等. 植物构件间异速生长关系研究进展[J]. 安徽农学通报, 2022, 28(2):36-39.
ZHU Miaomiao, ZHU Qianggen, LI Bo, et al. Research progress of allometry growth relationship between plant components [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2022, 28(2):36-39.
- [19] 张文馨. 山东植物群落及其物种多样性分布格局与形成机制[D]. 济南:山东大学, 2016.
ZHANG Wenxin. The spatial patterns of plant species diversity and their underlying mechanisms in Shandong Province, China [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [20] LINES E R, ZAVALA M A, PURVES D W, et al. Predictable changes in aboveground allometry of trees along gradients of temperature, aridity and competition[J]. Global Ecology & Biogeography, 2012, 21(10):1017-1028.
- [21] LEAL S, MELVIN T M, GRABNER M, et al. Tree-ring growth variability in the Austrian Alps: the influence of site, altitude, tree species and climate[J]. Boreas, 2007, 36(4):426-440.

(编辑:于善清)

(上接第131页)

- [7] YU Yongsheng. Optimal control of a nonlinear time-delay system in batch fermentation process[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014:1-7.
- [8] LIU Chongyang, GONG Zhaohua, LEE J, et al. Robust bi-objective optimal control of 1,3-propanediol microbial batch production process[J]. Journal of Process Control, 2019, 78:170-182.
- [9] HALE J, LUNEL S M V. Introduction to functional differential equations[M]. New York: Springer, 1993: 38-66.
- [10] 闫群民,马瑞卿,马永翔,等. 一种自适应模拟退火粒子群优化算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(4):120-127.
YAN Qunmin, MA Ruiqing, MA Yongxiang, et al. Adaptive simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xidian University, 2021, 48(4):120-127.
- [11] 李淑香. 基于模拟退火的粒子群算法在函数优化中的应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(6):664-668.
LI Shuxiang. Application of particle swarm optimization algorithm based on simulated annealing in function optimization[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(6):664-668.
- [12] 张佳楠. 混合遗传算法在多元系统 NRTL 方程二元交互作用参数回归中的应用[J]. 计算机与应用化学, 2018, 35(3):198-204.
ZHANG Jianan. Application of mixed genetic algorithm in regressing binary parameters of NRTL equation for multicomponent systems[J]. Computers and Applied Chemistry, 2018, 35(3):198-204.
- [13] 王储,南英,许航. 一种新的精英遗传算法及在多弹拦截分配策略的应用[J]. 航天控制, 2021, 39(4):59-66.
WANG Chu, NAN Ying, XU Hang. A new elite genetic algorithm and its application in multi-missile interception assignment strategy[J]. Aerospace Control, 2021, 39(4):59-66.
- [14] 王生亮,刘根友,高铭,等. 改进的自适应遗传算法在 TDOA 定位中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(2):254-258.
WANG Shengliang, LIU Genyou, GAO Ming, et al. Application of improved adaptive genetic algorithm in TDOA location [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(2):254-258.
- [15] 高彩霞,王宗涛,冯恩民,等. 微生物间歇发酵生产 1,3-丙二醇过程辨识与优化[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(5):771-774.
GAO Caixia, WANG Zongtao, FENG Enmin, et al. Parameter identification and optimization of process for bio-dissimilation of glycerol to 1,3-propanediol in batch culture[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(5):771-774.

(编辑:胡春燕)