

# 海拔对新源野杏树体结构及枝叶功能性状的影响

凌孝波<sup>1</sup> 郭传超<sup>1</sup> 吴明江<sup>1</sup> 郑凤<sup>1</sup> 王新宇<sup>1</sup> 杨洋<sup>1</sup> 王瑾<sup>2</sup> 刘立强<sup>1</sup>

(1. 新疆农业大学园艺学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 伊犁州林业科学研究院, 新疆伊犁森林生态系统国家定位观测研究站, 新疆伊宁 839300)

**摘要:** 以伊犁哈萨克自治州新源县吐尔根乡杏花沟不同海拔的新疆野杏自然种群为研究对象, 沿海拔1100~1700 m范围内保持沿海拔升高的连续性设置共12个样地, 以每3个样地分布为梯度, 分4级海拔研究了新疆野杏树体结构、当年生枝及叶功能性状与海拔变化的关系, 探索其对海拔的适应性。结果表明: 1200~1350 m海拔分布的新疆野杏种群密度、胸径和冠幅最大, 1100~1200 m海拔树体最高, 各海拔的野杏林种群密度与冠幅呈极显著正相关, 海拔对种群密度与胸径的直接作用分别是最大与最小; 随着海拔升高, 野杏叶面积、叶长、叶宽、比叶面积逐渐减小, 叶厚逐渐增大, 1350~1550 m海拔的叶鲜与干质量最大, 1200~1350 m海拔叶绿素值最大, 海拔梯度与叶长、叶宽呈极显著负相关, 与叶厚呈极显著正相关, 海拔对叶干质量的直接作用最大, 不同海拔的叶功能性状有不同程度的变异; 野杏当年生枝条1100~1200 m海拔枝条最长, 1200~1350 m海拔枝条粗度和叶片数量最大, 海拔变化与枝条长度呈极显著负相关, 与叶片数量呈显著负相关, 海拔对枝条长度的直接作用最大, 枝条变异程度随海拔升高而增大。新疆野杏自然种群的树体结构, 枝叶功能性状与海拔变化显著相关, 群体生长功能性状变化指示了其对海拔环境变化的适应性。

**关键词:** 新疆野杏; 海拔; 树体结构; 枝叶; 功能性状; 相关性

中图分类号: S662.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2025)03-0001-09

引文格式: 凌孝波, 郭传超, 吴明江, 等. 海拔对新源野杏树体结构及枝叶功能性状的影响 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2025, 45(3): 1-9. Ling X B, Guo C C, Wu M J, et al. Relationships between tree structures and functional traits of branches and leaves and altitude changes in *Prunus armeniaca* from Xinyuan[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2025, 45(3): 1-9. DOI: [10.11929/j.swfu.202404035](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202404035)



## Relationships between tree structures and functional traits of branches and leaves and altitude changes in *Prunus armeniaca* from Xinyuan

Ling Xiaobo<sup>1</sup>, Guo Chuanchao<sup>1</sup>, Wu Mingjiang<sup>1</sup>, Zheng Feng<sup>1</sup>, Wang Xinyu<sup>1</sup>,  
Yang Yang<sup>1</sup>, Wang Jin<sup>2</sup>, Liu Liqiang<sup>1</sup>

(1. College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Yili Forestry Research Institute, National Positioning Observation and Research Station of Yili Forest Ecosystem, Yining Xinjiang 839300, China)

**Abstract:** The structures and function of woody plants and the rule of variation of their current-year branches and leaf traits with altitude changes are important contents to grasp the adaptability of vertical distribution. Taking the natural population of *P. armeniaca* at different altitudes in Xinghuagou, Tuergen Township, Xinyuan County, Yili Kazak Autonomous Prefecture as the research object, a total of 12 plots were set up along the elevation of 1100~1700 m, and the distribution of each 3 plots was used as a gradient. The relationship between the tree structures, current-year branches and leaf functional traits of *P. armeniaca* and altitude changes was studied in

收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-06-08

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2023D01A29)资助; 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0501)资助; 国家自然科学基金项目(31460190)资助。

第1作者: 凌孝波(1998—), 男, 硕士研究生。研究方向: 果树学。Email: [1960345959@qq.com](mailto:1960345959@qq.com)。

通信作者: 刘立强(1975—), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师。研究方向: 果树栽培与生理学。Email: [llq9989@126.com](mailto:llq9989@126.com)。

four gradients, and its adaptability to altitude changes was explored. The results indicated that : (1) The population density, DBH and crown width of *P. armeniaca* were the highest at 1 200 ~ 1 350 m altitude, and reached the peak of tree heights at 1 100 ~ 1 200 m altitude. The population density and crown width of *P. armeniaca* forests at different altitudes were significantly positively correlated, and the direct effects of altitude on stand density and DBH were the largest and smallest, respectively. (2) With the increase of altitude, the leaf area, leaf length, leaf width and specific leaf area of *P. armeniaca* decreased gradually, and the leaf thickness increased gradually. The fresh and dry weight of leaves at 1 350 ~ 1 550 m altitude was the largest, and the chlorophyll value at 1 200 ~ 1 350 m altitude was the largest. Each altitude gradient was significantly negatively correlated with leaf length and leaf width, and was significantly positively correlated with leaf thickness. The direct effect of altitude on leaf dry weight was the largest, and the leaf functional traits at different altitudes had different degrees of variation. (3) The current-year branches of *P. armeniaca* were the longest at 1 100 ~ 1 200 m altitude, and the branch thickness and leaf number were the largest at 1 200 ~ 1 350 m altitude. There was a significant negative correlation between altitude change and branch length, and a significant negative correlation with leaf number. Altitude had the greatest direct effect on branch length, and the degree of branch variation increased with altitude. The tree structure and branch and leaf functional traits of *P. armeniaca*'s natural population were significantly correlated with altitude changes, and the changes of population's growth functional traits indicated its adaptability to different altitude environments.

**Key words:** altitude; *P. armeniaca*; tree structure; functional traits of branches and leaves; 1111; correlation

功能性状是指影响植物体定植、存活、生长和死亡的一系列属性, 其将生存环境、生态系统的功能与过程联系起来, 反映植物的环境适应性并影响生态系统功能<sup>[1-3]</sup>。枝条与叶片是体现植物生长功能的重要营养器官, 其性状与生物量积累指示了植物在不利环境影响下形成的生态适应策略, 与植物体对光照、水分、养分的吸收利用密切相关<sup>[4]</sup>。关于植物的枝叶功能性状的研究, 主要通过生物量、表型性状、光合化学物质和矿质元素等指标来呈现其生存、生产以及环境适应状况<sup>[5]</sup>。如, 在干旱环境和温度较低时, 植物呈现比叶面积减小、叶厚度增加的性状, 反映了自身的抗逆能力<sup>[6]</sup>; 在石漠化地区, 植物叶片数、小枝长、小枝粗度均显著降低<sup>[7]</sup>; 较高种植年限中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia*) 叶干物质含量、比叶面积较高<sup>[8]</sup>; 植物叶片响应海拔上升的环境条件变化, 调节提升氮、磷的吸收量来增强抗逆性<sup>[9]</sup>; 叶干物质含量可反映植物对水分和养分的吸收效率, 可指示对某一资源的获取及利用程度。叶片性状与枝条性状密切相关, 因为枝条是叶片所需养分与水分的关键运输及储存载体, 枝条构型的改变会对叶片的排布和养分运输造成影响, 而每个生长季发育的叶片与枝条的功能性状, 又取决于植物母体的功能性状。因此, 结合环境条件, 基于植物自然种群的群体生长发育结构功能, 开展叶片和枝条功能性状的研究, 对全

面掌握植物的环境适应性策略具有重要意义。

海拔是影响植物生长与分布的重要因子之一<sup>[10]</sup>, 其梯度变化可直接改变生境的水热光照条件。随着海拔的升高, 平均气温降低, 降水减少, 光照增强, 植物生长季变短。在异质性生存环境的影响下, 植物群体、枝与叶则演化出相应的功能性状, 建立对应的环境适应策略。随海拔升高, 云丘山榲子栎 (*Quercus baronii*) 和巴郎山异型柳 (*Salix dissa*) 叶片干质量、叶长宽和叶绿素总含量逐渐下降<sup>[11-12]</sup>; 黄山松 (*Pinus hwangshanensis*) 小枝的叶片数量、小枝长度、出叶强度则是逐渐增加<sup>[13]</sup>; 天山云杉 (*Picea schrenkiana*) 的叶长宽比、叶面积、气孔密度、叶磷和叶钾含量逐渐升高, 叶片氮和磷含量是下降的趋势。这些研究成果印证了植物功能性状的变化是其对生境适应的结果, 指示了生存环境<sup>[14]</sup>。不同生境下, 同一树种的叶片性状表现可能不同, 植物在种内和群落水平上的差异及其关系, 可客观反映植物功能性状的权衡和对生存环境的适应策略<sup>[15-16]</sup>。近年来, 关于植物功能性状间的研究主要集中于群落间、不同功能型之间的差异<sup>[17-18]</sup>, 而在种群尺度上开展功能性状的研究有助于深入了解关键物种植物对环境的适应机制。

新疆野杏 (*P. armeniaca*) 属普通杏种类, 是栽培杏的直接祖先<sup>[19]</sup>, 主要分布于伊犁河谷的落叶阔叶林<sup>[20]</sup>, 其既可混交林生存, 又可纯林建

群，其自然种群分布面积与数量，在伊犁野果林生态系统中具有重要地位。新疆野杏树势抗逆性较强，树冠圆形或扁圆形，叶片近圆形或者卵圆形，无绒毛，依据果实性状可划分为44个种下类型，具有丰富的表型与遗传多样性<sup>[21-22]</sup>，是理想的乔化砧木、育种原始材料和绿化树种<sup>[23]</sup>，资源的经济利用价值和生态功能价值至关重要。近年来，伊犁野果林的保护和经营管理工作受重视程度较低，致使野果林生态系统的稳定性受到过度放牧、病虫害、农牧开垦等生物因素和气候变化等环境因素的严重干扰，野杏等野生果树种群显著衰退，为国家二级保护物种<sup>[24]</sup>。面对新疆野杏生存的窘境，掌握其生长发育适应性，并以此制定保护措施，势在必行。分布在伊犁河谷两侧山地的新疆野杏，呈现显著的垂直生长分布特征，但对其随海拔变化的适应性还尚不明确。因此，本研究中选择海拔变化显著的新源县吐尔根乡杏花沟的野杏自然种群，研究不同海拔梯度与新疆野杏树体结构及其枝叶功能性状的关系，探究其对环境的适应性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究位于新源县巩乃斯河北岸的阿吾拉勒山南麓的吐尔根乡杏花沟的野杏林，呈连片密集分布的区域为海拔1000~1600 m的山地，林地土壤以黑钙土为主。2021年4月—2023年9月，在上述不同海拔样地监测该野果林年平均气温为10.69℃，最低气温出现在1月，为-21.50℃，最高气温出现在7月，为35.00℃，年平均湿度为55.61%，该自然种群为新疆野杏纯林，在分布的上限以上、阴坡、疏林地和空地，有数量较少的天山桦 (*Betula tianschanica*)、欧洲山杨 (*Populus tremula*)、灰柳 (*Salix cinerea*)、细穗柳 (*Salix tenuijulis*)、黑杨 (*Populus nigra*)、伊犁杨 (*Populus iliensis*) 等散生分布，在林缘、疏林地和空地，有稀少的忍冬 (*Lonicera humilis*)、绣线菊 (*Lonicera microphylla*) 和野蔷薇 (*Rosa* spp.) 等灌木分布，没有灌木层结构。

### 1.2 样地选择与野杏树体结构调查

于2023年7—8月，在新疆伊犁哈萨克自治州新源县吐尔根乡杏花沟的野杏自然种群，选择野杏群体垂直连续分布的区域，自下而上保持沿海拔升高的连续性，设置具有代表性的样地共

12个，样地大小为20 m×20 m，以每3个样地划分1个海拔梯度，共分为1100~1200 m ( $A_1$ )、1200~1350 m ( $A_2$ )、1350~1550 m ( $A_3$ )、1550~1650 m ( $A_4$ ) 4个海拔梯度。利用GPS定位样地，测定海拔、坡度、坡向等地形因子，对样方内乔木 ( $DBH \geq 5$  cm) 进行每木检尺，观测种群密度、胸径、树高和冠幅长度的树体结构参数。

### 1.3 叶片与枝条功能性状测定

在每个样地四角及中心位置共选择5株生长正常、接近平均胸径的新疆野杏，在样株的东、西、南、北各采集1个长势与大小基本一致的中型枝组，每一枝组选取7~8片成熟叶片，每样株取叶30片，测定叶绿素 (SPAD) 和叶片鲜质量 (FW)，然后用自封袋封装，放入保温箱保存。测量每个中型枝组上的所有当年生新梢长度 (TL) 和粗度 (TD)，记数新梢上叶片数量，用LA-S系列植物叶面积仪 (杭州万深检测科技有限公司，中国) 测定叶面积 (LA)、叶长 (LL)、叶宽 (LW)，使用游标卡尺测量叶片厚度 (LT)，然后将叶片在105℃杀青30 min后转入80℃烘至恒质量后称量干质量 (LM)。比叶面积 (SLA) 和叶干物质含量 (LDMC) 计算公式如下：

$$SLA = LA/LM \quad (1)$$

$$LDMC = LM/FW \times 100\% \quad (2)$$

### 1.4 数据分析

通过Excel 2021对数据进行处理，使用SPSS 26.0对不同海拔梯度野杏的群体结构和枝叶功能性状进行单因素方差分析，用Pearson相关分析法，分析海拔与树体结构及枝叶功能性状的关系，通径分析通过分解自变量与因变量之间的表面相关性，来研究自变量对因变量的直接重要性和间接重要性，以海拔梯度为因变量，野杏树体结构和枝叶功能性状为自变量通径分析海拔梯度对野杏树体结构和枝叶功能性状的直接作用和间接作用。自变量对因变量通径系数由自变量之间的相关系数及自变量对因变量的通径系数计算得到，计算公式为：

$$P_{xixj} = r_{ij} P_{jy} \quad (3)$$

式中： $P_{xixj}$ 为间接通径系数， $r_{ij}$ 为各性状间的相关系数， $P_{jy}$ 为通径系数。通径分析作图在draw.io中完成。

变异系数主要用于说明不同海拔梯度内枝叶功能性状的变异程度。其计算公式为：

$$\text{变异系数} = \text{标准差}/\text{平均数} \quad (4)$$

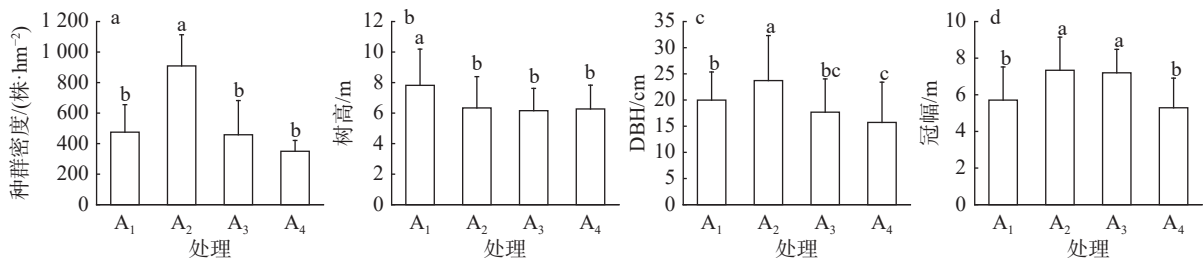
## 2 结果与分析

### 2.1 海拔对新疆野杏树体结构的影响

#### 2.1.1 不同海拔梯度野杏树体结构特征

由图1可知,不同海拔梯度对新疆野杏树体结构变化有显著影响( $P < 0.05$ )。新疆野杏密度分布特征是,  $A_2$  海拔的种群密度显著高于  $A_1$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  ( $P < 0.05$ ), 后三者之间无显著差异; 野杏树高变化特征是,  $A_1$  的树高显著高于  $A_2$ 、 $A_3$  和

$A_4$  ( $P < 0.05$ ), 后三者无显著性差异,  $A_3$  的最矮; 野杏胸径变化特征是,  $A_2$  的胸径显著高于  $A_1$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  ( $P < 0.05$ ),  $A_1$  显著高于  $A_4$  ( $P < 0.05$ ),  $A_4$  的胸径最小; 野杏冠幅变化特征是,  $A_2$  的冠幅最大,  $A_2$  与  $A_3$  显著高于  $A_1$  与  $A_4$  ( $P < 0.05$ ),  $A_2$  与  $A_3$ 、 $A_1$  与  $A_4$  皆无显著差异。随着海拔的升高, 种群密度、胸径和冠幅均呈现先升高后下降的趋势, 1200 m 以上分布的野杏树高差异不显著。



不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图1 不同海拔梯度野杏树体结构特征变化

Fig. 1 Changes of structural characteristics of *Prunus armeniaca* trees structure at different altitude gradients

#### 2.1.2 野杏树体结构与海拔的相关性

由表1可知,海拔梯度与组成树体结构的种群密度、树高、胸径、冠幅呈非显著负相关关系。树体结构组分中,种群密度与冠幅呈极显著正相关(0.850),与树高、胸径呈非显著正相关关系;树高、胸径、冠幅之间呈非显著正相关关系。

表1 海拔梯度与野杏树体结构的相关性

Table 1 Correlation between altitude gradient and *Prunus armeniaca* tree structure

	海拔梯度	种群密度	树高	胸径
林分密度	-0.468			
树高	-0.452	0.344		
胸径	-0.225	0.677	0.491	
冠幅	-0.164	0.850**	0.071	0.698

注: \*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

#### 2.1.3 野杏树体结构随海拔变化的通径分析

由图2可知,海拔梯度( $Y$ )对野杏树体结构( $X_j$ )的直接作用和通过其他因子的间接作用,海拔梯度对冠幅的直接作用大于间接作用,对种群密度、胸径、树高的间接作用大于直接作用;海拔梯度对种群密度和树高的作用为直接负作用,对胸径和冠幅的作用为直接正作用;海拔梯度对种群密度的直接与间接作用皆最大,直接与间接通径系数分别为-1.009和-1.888,对胸径的直接作用最小,通径系数为0.132。

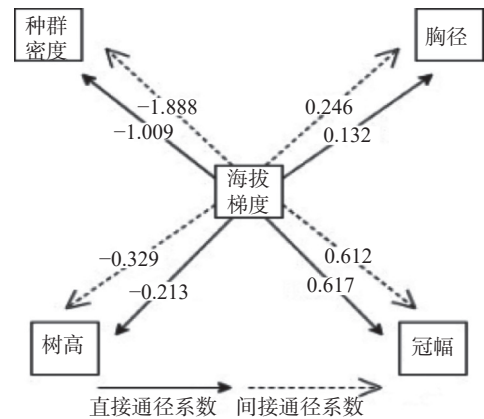


图2 野杏树体结构与海拔梯度的通径分析

Fig. 2 Path analysis of *Prunus armeniaca* tree structure and altitude gradient

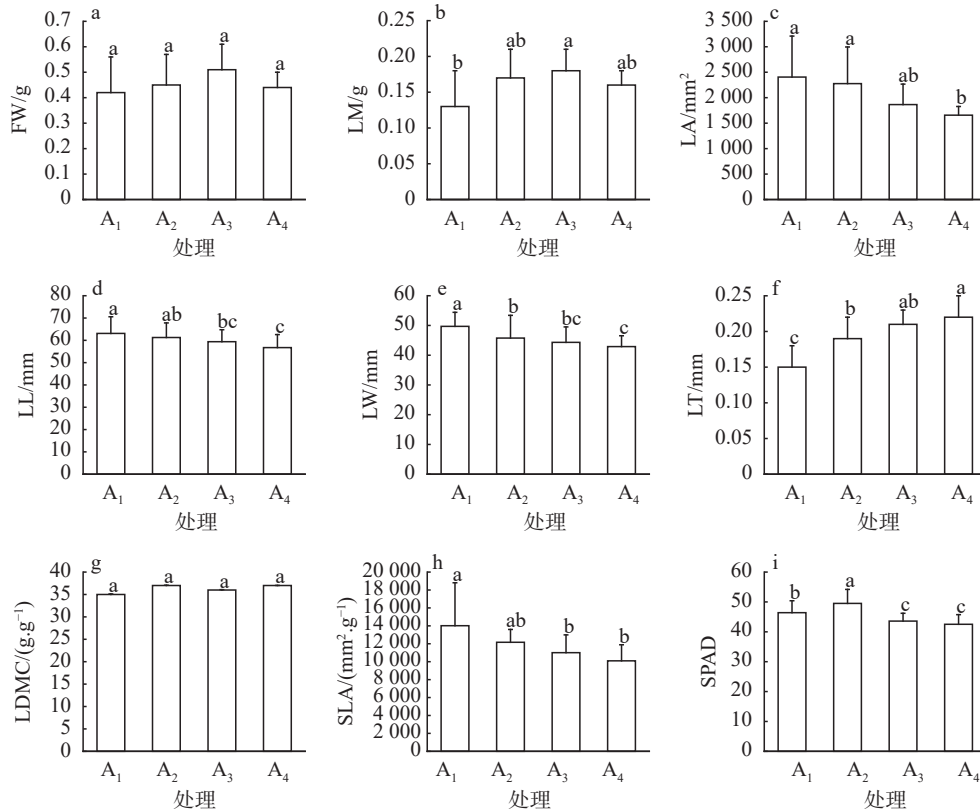
### 2.2 海拔对新疆野杏枝叶功能性状的影响

#### 2.2.1 不同海拔野杏的叶功能性状

由图3可知,不同海拔梯度叶鲜质量、叶干物质含量皆无显著差异;变化特征是,  $A_3$  的叶片干质量最大,  $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  显著高于  $A_1$  ( $P < 0.05$ ), 前三者之间差异不显著,  $A_1$  的叶片干质量最小;野杏叶面积变化特征是,  $A_1$  的叶面积最大,  $A_1$ 、 $A_2$  叶面积显著高于  $A_4$  ( $P < 0.05$ ), 且与  $A_3$  无显著差异,  $A_4$  的叶面积最小;野杏叶长的变化特征是,  $A_1$  的叶长最大, 显著高于  $A_3$ 、 $A_4$  ( $P < 0.05$ ),  $A_2$  显著高于  $A_4$  ( $P < 0.05$ ),  $A_4$  的叶长最小;野杏叶宽的变化特征是,  $A_1$  的

叶宽最大，显著高于 A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>、A<sub>4</sub> ( $P < 0.05$ )，A<sub>2</sub> 显著高于 A<sub>4</sub> ( $P < 0.05$ )，A<sub>4</sub> 的叶宽最小；野杏叶厚变化特征是，A<sub>4</sub> 的叶厚最大，显著高于 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> ( $P < 0.05$ )，A<sub>3</sub> 显著高于 A<sub>1</sub> ( $P < 0.05$ )，A<sub>1</sub> 的叶厚最小；野杏比叶面积变化特征是，A<sub>1</sub> 的比叶面积最大，A<sub>1</sub> 比叶面积显著高于 A<sub>3</sub>、

A<sub>4</sub> ( $P < 0.05$ )，其他海拔皆无显著差异，A<sub>4</sub> 的比叶面积最小；野杏叶绿素值变化特征是，A<sub>2</sub> 海拔的叶绿素值最高，显著高于 A<sub>1</sub>、A<sub>3</sub>、A<sub>4</sub> ( $P < 0.05$ )，A<sub>1</sub> 的叶绿素含量显著高于 A<sub>3</sub>、A<sub>4</sub> ( $P < 0.05$ )，且后两者之间无显著性差异，A<sub>4</sub> 海拔的叶绿素含量最低。



不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

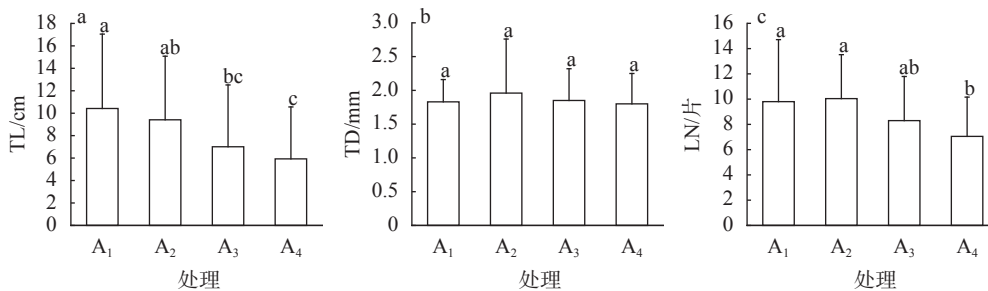
图 3 不同海拔梯度野杏叶功能性状

Fig. 3 Leaf functional traits of *Prunus armeniaca* at different altitude gradients

2.2.2 不同海拔野杏的枝条功能性状

由图 4 可知，不同海拔梯度野杏枝条粗度无显著差异；新疆野杏枝条长度变化特征是，A<sub>1</sub> 的枝条最长，A<sub>1</sub> 显著高于 A<sub>3</sub>、A<sub>4</sub> ( $P < 0.05$ )，A<sub>2</sub> 显著高于 A<sub>4</sub> ( $P < 0.05$ )，A<sub>4</sub> 的枝条长度最短；

野杏枝条叶片数量变化特征为，A<sub>2</sub> 的枝条叶片数最多，A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 显著高于 A<sub>4</sub> ( $P < 0.05$ )，与 A<sub>3</sub> 无显著差异，A<sub>4</sub> 的枝条叶片数最少。随着海拔的升高，野杏枝条长度逐渐减小，枝条粗度和生长叶片数均呈现先升高后下降的趋势。



不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 4 不同海拔梯度野杏枝条功能性状

Fig. 4 Functional traits of *Prunus armeniaca* twigs at different altitude gradients

### 2.2.3 不同海拔野杏枝叶性状的变异特征

由表2可知, 随海拔的变化, 野杏叶鲜质量、叶干质量、叶面积的变异系数随海拔升高而减小; 叶长的变异系数, 由大到小依次为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_4$ 、 $A_3$ ; 叶宽的变异系数由大到小为  $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_1$ 、 $A_4$ ; 叶干物质含量与比叶面积的变异系数, 由大到小依次为  $A_1$ 、 $A_3$ 、 $A_2$ 、 $A_4$ ; 叶绿素值的变异系数, 由大到小依次为  $A_2$ 、 $A_1$ 、 $A_4$ 、 $A_3$ 。叶片功能性状总体变异系数由大到小依次为叶面积、叶鲜质量、叶干质量、比叶面积、叶干物质含量、叶厚、叶宽、叶长、叶绿素含量, 阈值为 3.05%~41.99%, 其中叶面积和叶鲜质量的

变异系数最大, 分别为 25.58% 和 24.48%, 属于中等变异, 叶绿素含量的变异系数最小, 为 7.97%, 属于弱变异。

野杏枝条长度变异系数由大到小依次为  $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_2$ 、 $A_1$ ; 枝条粗度变异系数由大到小依次为  $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_1$ ; 枝条叶片数量变异系数由大到小依次为  $A_1$ 、 $A_4$ 、 $A_3$ 、 $A_2$ 。野杏枝功能性状总体变异顺序由大到小为枝条长度、枝条叶片数量、枝条粗度, 变异系数阈值为 18.44%~78.88%。枝条长度变异系数最大为 70.13%, 属于强变异, 枝条粗度变异系数最小为 27.71%, 属于中等变异。

表2 不同海拔的野杏枝叶功能性状变异性

Table 2 Variability of functional traits of *Prunus armeniaca* twigs and leaves at different altitudes

海拔梯度	FW	LM	LA	LL	LW	LT	LDMC	SLA	SPAD	TL	TD	LN
$A_1$	34.59	41.99	33.45	11.8	9.5	16.3	33.61	34.2	8.57	60.22	18.44	50.16
$A_2$	28.68	25.65	31.65	10.7	16.67	12.9	20.11	11.72	9.47	63.65	40.78	34.68
$A_3$	20.86	18.31	21.58	9.02	11.71	11.54	21.15	17.99	6.02	78.63	25.41	42.12
$A_4$	20.85	14.42	10.29	10.28	8.64	14.6	6.07	17.75	7.6	78.02	25.26	44.15
总体	24.48	24.17	25.58	10.45	11.63	13.83	20	21.13	7.97	70.13	27.71	42.64

### 2.2.4 野杏叶功能性状与海拔的相关性

由表3可知, 海拔梯度与叶长、叶宽呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与叶厚呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与叶鲜质量、叶干质量、叶干物质含量呈非显著正相关, 与比叶面积、叶绿素含量呈非显著负相关, 海拔梯度与叶宽 (-0.960) 的相关系数绝对值最大; 叶鲜质量与叶干质量、叶面积呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与叶长、叶宽、叶干物质含量、叶厚、比叶面积、叶绿素含量无显著相关性; 叶干质量与叶干物质含量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与比叶面积呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 与叶面积、叶长、叶宽、叶厚、叶绿素

含量无显著相关性; 叶面积与叶长呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与叶厚、叶宽、叶干物质含量、比叶面积、叶绿素含量无显著相关性; 叶长与叶宽呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与比叶面积呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 与叶厚、叶干物质含量、叶绿素含量无显著相关性; 叶宽与叶厚呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与叶干物质含量、比叶面积、叶绿素含量无显著相关性; 叶厚与比叶面积呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与叶干物质含量、叶绿素含量无显著相关性; 叶干物质含量与比叶面积、叶绿素含量无显著相关性; 比叶面积与叶绿素含量无显著相关性。

表3 海拔梯度与野杏叶片功能性状相关性

Table 3 Correlation between altitude gradient and functional traits of *Prunus armeniaca* leaves

	海拔梯度	FW	LM	LA	LL	LW	LT	LDMC
FW	0.072							
LM	0.389	0.769*						
LA	-0.341	0.814*	0.598					
LL	-0.722**	0.588	0.198	0.734*				
LW	-0.960**	0.006	-0.383	0.438	0.733*			
LT	0.849**	0.295	0.617	-0.124	-0.484	-0.879**		
LDMC	0.015	0.508	0.801*	0.595	0.700	0.622	0.362	
SLA	-0.549	-0.694	-0.789*	-0.368	-0.729*	-0.250	-0.899**	-0.567
SPAD值	-0.504	0.440	0.184	0.686	0.491	0.666	0.337	0.477

注: \*表示显著相关 ( $P < 0.05$ ), \*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

### 2.2.5 野杏叶功能性状随海拔变化的通径分析

由图5可知, 海拔梯度 ( $Y$ ) 对野杏叶功能性

状 ( $X_j$ ) 存在直接作用和间接作用。海拔梯度对叶厚的直接作用大于间接作用, 对叶干质量、叶

面积、叶长、叶干物质含量、比叶面积、叶绿素含量的间接作用大于直接作用；海拔梯度对叶干质量、叶绿素含量的作用为直接正作用，对叶面积、叶长、叶厚、叶干物质含量、比叶面积的作用为直接负作用；海拔梯度对叶干质量的直接作用最大，对叶绿素的直接作用最小，直接途径系数分别为 1.912 和 0.144；海拔梯度对比叶面积的间接作用最大，间接途径系数为 3.36，对叶绿素的间接作用最小，间接途径系数为 0.22。

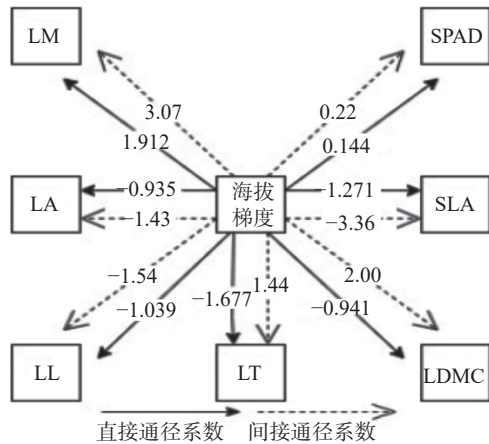


图 5 野杏叶功能性状与海拔梯度的通径分析  
Fig. 5 Path analysis of functional traits of *Prunus armeniaca* leaves and altitude gradient

2.2.6 野杏枝条功能性状与海拔的相关性

由表 4 可知，海拔梯度与枝条长度呈极显著负相关 ( $P < 0.05$ )，与枝条叶片数量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )，与枝条粗度呈非显著负相关，与枝条长度 (-0.856) 的相关系数绝对值最大。枝条功能性状间有显著相关性，枝条长度与枝条叶片数量呈极显著正相关 ( $P < 0.05$ )，与枝条粗度呈非显著正相关；枝条粗度与枝条叶片数量呈非显著正相关。

表 4 海拔梯度与野杏枝条功能性状相关性

Table 4 Correlation between altitude gradient and functional traits of *Prunus armeniaca* twigs

	海拔梯度	TL	TD
TL	-0.856**		
TD	-0.464	0.546	
LN	-0.745*	0.915**	0.673

注：\*表示显著相关 ( $P < 0.05$ )，\*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

2.2.7 野杏枝条功能性状随海拔变化的通径分析

由图 6 可知，海拔梯度 ( $Y$ ) 对野杏枝条功能性状 ( $X_j$ ) 存在直接作用和间接作用。海拔梯度对枝条叶片数量的作用为直接正作用，对枝条长度、枝条粗度的作用为直接负作用；海拔梯度对枝条长度、枝条粗度、枝条叶片数量间接作用大于直接作用；海拔梯度对枝条长度的直接作用最

大，对枝条粗度的直接作用最小，直接途径系数分别为 -1.907 和 -0.07；海拔梯度对枝条长度的间接系数最大为 -2.786。

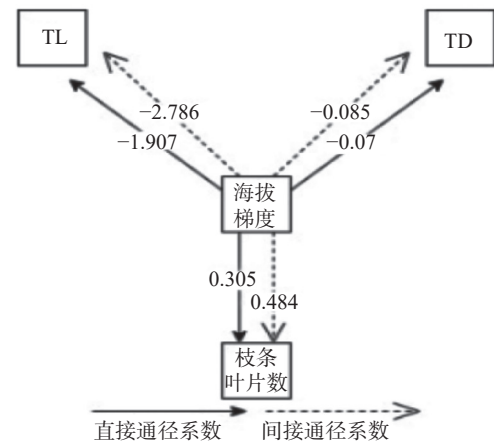


图 6 野杏枝条功能性状与海拔梯度的通径分析  
Fig. 6 Path analysis of functional traits of *Prunus armeniaca* twigs and altitude gradient

3 结论与讨论

3.1 讨论

3.1.1 海拔对野杏树体结构功能的影响

植物形态特征是植物在外部形态上对环境条件的直观反应，当植物受到外界环境变化时，会通过改变自身形态以适应环境变化<sup>[25]</sup>。在本研究中，随着海拔的升高，野杏的种群密度、树高、胸径、冠幅呈现下降趋势，树体结构均与海拔升高呈非显著负相关关系。低海拔相较于中高海拔太阳总辐射相对较小，植物能汲取更多的土壤水分和养分，植物采用较大的母树体结构，使植株叶片占据更充分的空间位置，有利于获取光照资源，但随着海拔的升高，气温逐渐下降、增强的光照强度和变薄的土层厚度，增加了植物生长胁迫，影响了植物代谢，植物细胞分裂的相对速率下降，从而阻碍了树木的生长发育<sup>[26-27]</sup>。同时，高海拔风速和降雪较大，野杏以缩减树冠面积，降低高度等方式将更多资源用于根部进行植株的固定和支撑，减少风害、降雪带来的机械折断压力。这是植物权衡环境条件后产生的适应性结果，通常资源丰富的区域，植株更高大、粗壮，呈现出其资源获取的策略<sup>[28]</sup>。

3.1.2 海拔对野杏叶功能性状的影响

植物叶片的生长发育，会对海拔梯度引起的综合生境变化做出响应。在本研究中，野杏叶片的功能性状在不同的海拔间存在不同的变异程度，这与对藏东南川滇栎 (*Quercus aquifolioides*) 叶片的变异程度研究结果一致<sup>[29]</sup>，表明植物叶功能性状在异质环境中，通过叶片形态表征变异来

对生境做出响应。在叶功能性状中,叶面积变异程度最大,为25.58%,说明植物生长受到外界环境干扰时,叶面积能准确反映生境间的差异。本研究中,叶面积、比叶面积、叶长、叶宽、叶绿素含量沿海拔升高显著下降,叶厚沿海拔升高显著升高,其他功能性状沿海拔上升差异不显著,不同海拔的野杏形成了不同的叶功能性状特性以适应不同的生境。这些差异指示了其适应不同地形及其小气候的生存策略。本研究发现海拔与叶长、叶宽呈极显著正相关,与叶厚呈极显著正相关,同时,随海拔的升高,野杏叶面积和比叶面积逐渐变小,与井冈山鹿角杜鹃(*Rhododendron latoucheae*)群落灌木层植物功能性状<sup>[30]</sup>的研究结果基本一致。导致这种现象的原因是低海拔区域竞争较大,植物需要较大的叶面积来接收光照,以便最大程度进行光合作用。而高海拔植株为了对外界各种环境胁迫做出防御,通过减少叶面积、增加叶厚来降低呼吸与蒸腾带来的消耗,以此减少辐射伤害来适应资源匮乏的环境<sup>[31]</sup>。叶绿素含量直接影响植物的光合能力<sup>[32]</sup>,低海拔梯度的新疆野杏叶绿素含量高,有较好的光合效果,这与不同海拔岳桦幼树(*Betula ermanii*)叶绿素含量<sup>[33]</sup>研究结果相同。海拔升高,野杏叶绿素含量降低,既与高海拔的低温环境降低叶绿素合成酶活性有关<sup>[34]</sup>,还与野杏通过减少叶绿素含量来减轻光辐射伤害有关,从生理与形态方面共同调节,以适应高海拔梯度的环境变化。

除了环境因素作用于植物叶片功能性状的变化,植物通过各性状间协同和权衡来适应环境变化,进一步诠释了植物在不同环境中的生存策略<sup>[35]</sup>。在海拔梯度下,新疆野杏比叶面积与叶干质量、叶长呈显著负相关,与叶厚呈极显著负相关,与檫木(*Sassafras tzumu*)叶片功能性状<sup>[36]</sup>研究结果基本一致,这表明较低的比叶面积具有较高的叶干质量,指示了植物在高海拔环境下的防御特征<sup>[37]</sup>。研究发现,叶干物质含量的增加,比叶面积减小,叶片内部水分向叶片扩散的距离增大,降低了植物体内水分流失速度<sup>[38]</sup>,从而更好的适应生存环境。比叶面积可以反映植物获取资源的能力,叶干物质含量一定程度上代表了植物对某一资源环境获取的能力。相关研究表明比叶面积与叶干物质含量呈显著负相关<sup>[39-40]</sup>,但在本研究中比叶面积与叶干物质含量相关性不显著,由此可见,不同环境,不同树种叶功能性状间的相关性存在不确定性。

### 3.1.3 海拔对野杏枝条功能性状的影响

植物枝条功能性状是反映植物对外界环境适应的关键属性特征,新疆野杏枝条与海拔的关系表明,枝条作为植物个体构建的重要组成部分,

其生长发育程度,与承载的叶片性状息息相关,本研究中,新疆野杏当年生枝条功能性状的变异系数均在中等以上,同时海拔变化对野杏枝条长度和单枝叶片数量存在显著影响,说明了新疆野杏为适应不同海拔生境而表现出不同枝条功能性状组合的适应策略。相关性与通径分析表明,随新疆野杏分布的海拔升高,其枝条长度和单枝叶片数量逐渐减小,并与枝长、叶片数呈极显著和显著负相关,枝条长度与叶片数量呈极显著正相关,这与甘肃省扎尕梁北坡头花杜鹃(*Rhododendron capitatum*)的研究结果基本一致<sup>[41]</sup>。在新疆野杏自然种群的的低海拔分布区,林分种群郁闭度与密度均较大,为满足其生存和发展的需求,枝条通过较长纵向生长来拓展生存空间,增加光截获量,提高繁殖成效,适应环境变化<sup>[42]</sup>,而高海拔小枝变短可能与抵抗风力,减少低温、强光等恶劣环境带来的影响有关,说明随着海拔上升,野杏地上部分可利用资源获取减少。而植物性状在在面对环境胁迫时,其表型可塑性,能够对资源进行最优化分配以适应海拔生境的改变<sup>[43]</sup>。

## 3.2 结论

新源吐尔根新疆野杏自然种群分布的海拔变化,对野杏树体结构和枝叶功能性状有显著影响。沿海拔升高,野杏群体密度、树体胸径和冠幅、枝条粗度和枝条叶片数皆是先升高后下降;叶面积、叶长、叶宽、比叶面积逐渐减小,叶厚逐渐增大;枝条长度逐渐减小。海拔梯度对林分密度、叶干质量和枝条长度的直接作用最大,野杏沿海拔变化的异质环境下有较强的可塑性,以有利性状组合指示对垂直分布生境变化的适应性。

## [参 考 文 献]

- [1] Violle C, Navas M L, Vile D, et al. Let the concept of trait be functional[J]. *Oikos*, 2007, 116(5): 882-892.
- [2] 程久菊,张雪妮,张子洋,等.艾比湖不同水盐环境荒漠植物种间关联格局下的叶片功能性状差异分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2022, 31(3): 18-25.
- [3] 赵丹,邓福英.西双版纳热带林植物功能性状与演替及环境因子的关系[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2024, 44(3): 90-99.
- [4] McIntyre S, Lavorel S, Landsberg J, et al. Disturbance response in vegetation—towards a global perspective on functional traits [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1999, 10(5): 621-630.
- [5] 李玲,孙宇婷,任杏,等.不同生长期薰衣草枝叶功能性状及其与环境因子的相关性[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(12): 21-28.
- [6] 宋光,温仲明,郑颖,等.陕北黄土高原刺槐植物功能性状与气象因子的关系[J]. *水土保持研究*, 2013,



- 20(3): 125–130.
- [7] 宋海燕, 张静, 赵雅洁, 等. 不同程度石漠化对金山栎莲末端小枝的生长和生物量积累及分配的影响 [J]. *植物科学学报*, 2018, 36(1): 103–111.
- [8] 李琴, 王磊, 张雪, 等. 不同种植年限中间锦鸡儿叶片功能性状的差异性研究 [J]. *林业科学研究*, 2023, 36(4): 173–182.
- [9] 赖媛, 张玲玲, 郭英荣, 等. 武夷山不同海拔杜鹃和黄山松叶片功能性状的变化 [J]. *生态学报*, 2021, 40(7): 1988–1996.
- [10] 冯哲, 乌俊杰, 于小莉, 等. 云南苍山西坡森林木本植物幼苗组成的海拔梯度格局及其年际动态 [J]. *西部林业科学*, 2023, 52(4): 161–167.
- [11] 卫晶, 苗艳明, 毕润成. 云丘山不同海拔梯度榧子栎叶性特征研究 [J]. *广西植物*, 2014, 34(2): 281–286.
- [12] 冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等. 巴郎山异型柳叶片功能性状及性状间关系对海拔的响应 [J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2712–2718.
- [13] 李曼, 郑媛, 郭英荣, 等. 武夷山不同海拔黄山松枝干大小关系 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 537–544.
- [14] 张慧文, 马剑英, 孙伟, 等. 不同海拔天山云杉叶功能性状及其与土壤因子的关系 [J]. *生态学报*, 2010, 30(21): 5747–5758.
- [15] Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Garnier E, et al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide [J]. *Australian Journal of Botany*, 2013, 61(3): 167.
- [16] 刘润红, 白金莲, 包含, 等. 桂林岩溶石山青冈群落主要木本植物功能性状变异与关联 [J]. *植物生态学报*, 2020, 44(8): 828–841.
- [17] 万丹, 刘检明, 徐耀粘, 等. 亚热带山地常绿落叶阔叶混交林物种幼苗功能性状差异研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(4): 938–949.
- [18] 石钰琛, 王金牛, 吴宁, 等. 不同功能型园林植物枝叶性状的差异与关联 [J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(5): 1109–1119.
- [19] 林培钧, 崔乃然. 天山野果林资源: 伊犁野果林综合研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2000: 141–163.
- [20] 崔大方, 廖文波, 羊海军, 等. 中国伊犁天山野果林区系表征地理成分及区系发生的研究 [J]. *林业科学研究*, 2006, 19(5): 555–560.
- [21] 刘娟, 廖康, 刘欢, 等. 新疆野杏种质资源表型性状多样性研究 [J]. *西北植物学报*, 2015, 35(5): 1021–1030.
- [22] 曹倩, 廖康, 刘娟, 等. 基于 ISSR 分子标记分析新疆野杏遗传多样性 [J]. *新疆农业科学*, 2015, 52(9): 1600–1606.
- [23] 王磊. 新疆野苹果和新疆野杏 [J]. *新疆农业科学*, 1989, 26(6): 33–34.
- [24] 王永刚, 叶强, 王艺菡, 等. 新疆分布的国家重点保护野生植物地理成分及分布特征 [J]. *植物资源与环境学报*, 2022, 31(4): 20–27.
- [25] 段桂芳, 单立山, 李毅, 等. 降水格局变化对红砂幼苗生长的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(20): 6457–6464.
- [26] Angert A L. Growth and leaf physiology of monkey-flowers with different altitude ranges [J]. *Oecologia*, 2006, 148(2): 183–194.
- [27] Friend A D, Woodward F I. Evolutionary and eco-physiological responses of mountain plants to the growing season environment [M]// *Advances in Ecological Research*. Amsterdam: Elsevier, 1990: 59–124.
- [28] Asefa M, Cao M, Zhang G C, et al. Environmental filtering structures tree functional traits combination and lineages across space in tropical tree assemblages [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 132.
- [29] 向琳, 陈芳清, 耿梦娅, 等. 井冈山鹿角杜鹃群落灌木层植物叶功能性状对海拔梯度的响应 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(2): 129–138.
- [30] 王超, 卢杰, 周晨霓, 等. 藏东南川滇高山栎叶功能性状海拔分布特征 [J]. *森林与环境学报*, 2021, 41(4): 366–372.
- [31] Wilson P J, Thompson K, Hodgson J G. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies [J]. *New Phytologist*, 1999, 143(1): 155–162.
- [32] 宗亚倩, 全伟, 李建平, 等. 红茎与绿茎紫花苜蓿色素及缩合单宁含量的比较分析 [J]. *云南农业大学学报 (自然科学)*, 2023, 38(6): 1067–1072.
- [33] 胡启鹏, 郭志华, 孙玲玲, 等. 长白山林线树种岳桦幼树叶功能性状随海拔梯度的变化 [J]. *生态学报*, 2013, 33(12): 3594–3601.
- [34] 李佳佳, 于旭东, 蔡泽坪, 等. 高等植物叶绿素生物合成研究进展 [J]. *分子植物育种*, 2019, 17(18): 6013–6019.
- [35] 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.
- [36] 蒋艾平, 姜景民, 刘军. 樟木叶片性状沿海拔梯度的响应特征 [J]. *生态学报*, 2016, 35(6): 1467–1474.
- [37] Vendramini F, Díaz S, Gurrich D E, et al. Leaf traits as indicators of resource-use strategy in floras with succulent species [J]. *New Phytologist*, 2002, 154(1): 147–157.
- [38] Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. *Nature*, 2004, 428: 821–827.
- [39] 刘思文, 艾也博, 刘艳红. 北京松山油松叶功能性状沿海拔梯度的变化及其环境解释 [J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(4): 47–55.
- [40] 杨锐, 张博睿, 王玲玲, 等. 元谋干热河谷植物功能性状组合的海拔梯度响应 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 49–56.
- [41] 杨克彤, 陈国鹏, 鲜骏仁, 等. 甘肃省扎尕梁北坡头花杜鹃枝叶性状特征 [J]. *草业学报*, 2022, 31(2): 111–120.
- [42] Wang X P, Fang J Y, Tang Z Y, et al. Climatic control of primary forest structure and DBH–height allometry in Northeast China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234(1/2/3): 264–274.
- [43] 李磊, 刘彤, 刘斌, 等. 新疆北部拟南芥自然居群表型变异与协变 [J]. *生物多样性*, 2010, 18(5): 497–508.

(责任编辑 冯雪)