

doi:10.3969/j.issn.1006-9690.2024.05.009

## 5 种杜鹃花叶片生理特性对海拔高度适应性初探

胡余楠, 张涛, 胡苑, 梁同军, 唐忠炳, 彭焱松\*

(江西省、中国科学院庐山植物园, 江西九江 332900)

**摘要** 目的: 探究杜鹃花属(*Rhododendron* L.) 植物在低海拔地区生长的适应性响应机制。方法: 本研究选取 5 种杜鹃花属植物为研究对象, 分别通过统计分析其叶片长宽比、光合色素含量、花青素含量、丙二醛含量差异及其与海拔之间的关系, 初步探究了杜鹃花属植物在低海拔地区的形态、生理适应性响应机制。结果: (1) 5 种杜鹃花叶片的长宽比随海拔高度变化无显著变化规律; (2) 5 种杜鹃花叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、花青素含量整体上随海拔的升高呈减少趋势; (3) 白花杜鹃、杜鹃、锦绣杜鹃的丙二醛含量随海拔高度的增加而降低, 鹿角杜鹃和猴头杜鹃的丙二醛含量随海拔的升高而增加, 但鹿角杜鹃在两个海拔地的丙二醛含量均较低。结论: 5 种杜鹃花属植物在两种海拔栽培地均具有一定的生境适应性。

**关键词** 杜鹃花; 海拔; 引种栽培; 适应性

中图分类号: Q944

文献标识码: A

文章编号: 1006-9690(2024)05-0057-06

## Preliminary Study on the Adaptability of Leaf Physiological Characteristics of Five *Rhododendron* Species to Altitude

Hu Yunan, Zhang Tao, Hu Wan, Liang Tongjun, Tang Zhongbing, Peng Yansong\*

(Lushan Botanical Garden, Jiangxi Province and Chinese Academy of Sciences, Jiujiang 332900, China)

**Abstract** Objective: To explore the adaptive response mechanisms of *Rhododendron* L. species grown at low altitudes. Methods: Five *Rhododendron* species were selected for this study. The relationship between altitude and leaf length/width ratio, photosynthetic pigment content, anthocyanin content, and malondialdehyde (MDA) level were analyzed to investigate their morphological and physiological adaptability in low-altitude areas. Results: (1) The leaf length/width ratios of the five *Rhododendron* species showed no significant changes with altitude variations. (2) The levels of chlorophyll a, chlorophyll b, and anthocyanins generally decreased as altitude increased. (3) MDA levels in *R. mucronatum*, *R. simsii*, and *R. × pulchrum* decreased with rising altitude, whereas those in *R. latoucheae* and *R. simiarum* increased, although *R. latoucheae* maintained lower MDA levels at both tested altitudes. Conclusion: The five *Rhododendron* species exhibited certain adaptability to both of the cultivation altitudes.

**Key words** *Rhododendron*; Altitude; Acclimatization; Adaptability

植物在生长发育过程中受到各种非生物因素胁迫的影响, 如气候因子(如光照、温度等)、水分因子和土壤因子等。光照、温度、水分、CO<sub>2</sub> 浓度等随海拔高度的变化具有显著性差异<sup>[1]</sup>, 但植物在长期

进化过程中演化出一系列生理生态机制以适应环境的变化。

杜鹃花属(*Rhododendron* L.) 是杜鹃花科(Ericaceae) 中最大的属, 杜鹃花属植物统称为杜鹃花, 全

收稿日期: 2023-09-22, 录用日期: 2024-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41961009)。

作者简介: 胡余楠(1988-), 男, 汉族, 江西南昌人, 研究实习员, 研究方向为植物分类学。E-mail: 342675990@qq.com

\*通讯作者: 彭焱松(1975-), 男, 汉族, 江西九江人, 硕士, 研究员, 研究方向为植物分类学。E-mail: 454260156@qq.com

世界共有 960 种<sup>[2]</sup>。我国是杜鹃花属植物种类最丰富的国家,约有 700 余种<sup>[3]</sup>。杜鹃花属高山植物,多生长于海拔 500 ~ 2 500 m 的山地疏灌丛或松林下,其株型优美、花大色艳、开花时间长,具有很高的观赏和应用价值。国际上一些植物园甚至有“没有杜鹃不成园”的说法<sup>[4]</sup>。但受杜鹃花不耐高温和干旱生物学特性的影响,低海拔地区杜鹃花的产业化及在园林中的推广应用受到了严重的制约。

有研究表明,大多杜鹃花适应不了高温,依赖于较多的降水量,主要分布于较高的海拔带<sup>[5]</sup>。随海拔的升高,杜鹃花叶片重量、厚度、比叶面积增加,叶片氮含量升高,干物质含量降低,且叶片角质层厚度、上下表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶片厚度均呈现增加的趋势<sup>[6-8]</sup>。目前,关于低海拔地区杜鹃花的引种驯化仍然是一个技术难题。为探究不同杜鹃花属植物在低海拔生境下的适应性差异,本研究选取 5 种杜鹃花属植物为试验材料,通过观察分析其叶片长宽比、光合色素含量、花青素含量、丙二醛含量的变化及其与生长环境的关系,初步探究高山杜鹃在低海拔地区的形态、生理适应性响应机制,进而探讨其最适生长环境,为供试杜鹃花在低海拔地区的引种栽培研究提供依据,同时也对其他杜鹃花属植物乃至高山植物的物种保育提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选取 5 种杜鹃花属植物为供试材料,详见表 1。

表 1 供试植物材料概况

Tab. 1 Overview of the tested plant materials

植物名称	拉丁学名
猴头杜鹃	<i>Rhododendron simiarum</i> Hance
白花杜鹃	<i>Rhododendron mucronatum</i> (Blume) G. Don
杜鹃	<i>Rhododendron simsii</i> Planch.
锦绣杜鹃	<i>Rhododendron × pulchrum</i> Sweet
鹿角杜鹃	<i>Rhododendron latoucheae</i> Franch.

### 1.2 研究地概况

高海拔(High elevation, HE)采样点位于江西省九江市庐山东南部的江西省、中国科学院庐山植物园杜鹃花专类园(115°59' E、29°35' N,海拔 1 000 m)。此处四周环山,地形起伏,沟壑纵横,溪流曲折,土壤类型为山地黄壤和黄棕壤,土壤偏酸性,年均气温 11.4°C,极端最高气温 31°C,极端最低气温

-16.8°C,年均降水量 1 929.2 mm,降水日 170 d,相对湿度 80%,无霜期 230 d,云雾日 195.5 d。全年阴雨绵绵,日照时数仅 1 330 h 左右,夏无酷暑、冬无严寒<sup>[9]</sup>,属亚热带东部湿润型季风山地气候。

低海拔(Low elevation, LE)采样点位于江西省九江市威家镇东北部的江西省、中国科学院庐山植物园鄱阳湖分园杜鹃花区(116°05' E、29°40' N,65.6 m)。此处坐落于庐山脚下,主要由低山丘陵、缓坡和湿地组成,土壤类型为红壤,常年雨量充沛。年平均气温 17°C ~ 18°C,极端最高气温 40.9°C,极端最低气温 -7.1°C,无霜期近 300 d。年平均日照时数 1 600 ~ 1 670 h,年平均降水量 1 388 mm,属亚热带季风气候。

### 1.3 研究方法

分别在高海拔(HE)采样点和低海拔(LE)采样点进行样品采集,每个采样点对 5 种杜鹃各选五株,每株分别从不同方位采集三份无病虫害成熟叶片材料。采用游标卡尺(0.01 mm)测量叶片的长度与宽度,并计算叶片长宽比(叶片长宽比 = 叶长/叶宽);叶绿素提取与测定参照肖和忠等<sup>[10]</sup>的测定方法,采用 95% 乙醇浸提法;花青素的提取与含量测定依据李小芳<sup>[11]</sup>的测定方法,采用 0.1 mol/L 盐酸浸提法;丙二醛含量的测定参考王学奎<sup>[12]</sup>的测定方法,采用硫代巴比妥酸(TBA)法。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2003、SPSS 19.0 统计软件对数据进行分析处理,采用 Origin 9.0 作图软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同杜鹃品种叶片长宽比

由图 1 可以看出,不同海拔生境下,不同杜鹃品种叶片长宽比变化不敏感,未表现出较明显的整体变化差异。猴头杜鹃在两种海拔地下的叶片长宽比显著高于其他 4 个物种( $P < 0.05$ )。猴头杜鹃和杜鹃在低海拔地区的叶片长宽比大于其在高海拔地区的叶片长宽比,且呈现出显著性差异( $P < 0.05$ )。而白花杜鹃、锦绣杜鹃和鹿角杜鹃在高海拔地区叶片长宽比大于其在低海拔地区的叶片长宽比,且呈现出显著性差异( $P < 0.05$ )。

### 2.2 海拔梯度对 5 种杜鹃叶片叶绿素含量的影响

两种海拔梯度下 5 种杜鹃叶片叶绿素含量如图 2 所示。叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量随海拔升高整体上呈现下降的趋势,但猴头杜鹃和杜鹃变化趋势相反。高海拔采样点中白花杜鹃总叶绿素

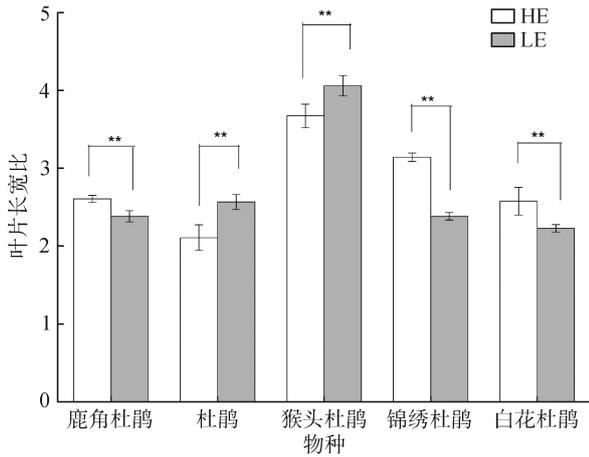


图 1 不同海拔梯度 5 种杜鹃花属植物叶片长宽比

Fig. 1 Comparison of leaf length/width ratio of the five species of *Rhododendron* at different altitudes

注:\*\*代表差异极显著( $P < 0.01$ )。

含量、叶绿素 b 含量均为最高,而鹿角杜鹃总叶绿素含量、叶绿素 b 含量最低,且白花杜鹃总叶绿素含量、叶绿素 b 含量分别是鹿角杜鹃的 33.31 倍和 8.51 倍。低海拔采样点中白花杜鹃总叶绿素含量、叶绿素 b 含量均为最高,猴头杜鹃总叶绿素含量、叶绿素 b 含量最低。两种海拔采样点下,随着海拔的升高,白花杜鹃总叶绿素变化趋势不明显,仅下降 3.76%;鹿角杜鹃总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 变化最为显著,分别下降了 61.15%、49.81% 和 77.84%;猴头杜鹃总叶绿素、叶绿素 a 和叶绿素 b 含量分别增加了 34.46%、3.86% 和 81.46%。

### 2.3 海拔梯度对 5 种杜鹃花叶片花青素含量的影响

如图 3 所示,鹿角杜鹃、杜鹃、锦绣杜鹃、白花杜鹃叶片花青素含量均随着海拔的变化呈现出显著性差异( $P < 0.05$ )。花青素含量随海拔高度的升高整体呈现下降的趋势,但是鹿角杜鹃变化趋势相反,随海拔高度的升高花青素含量升高。白花杜鹃和杜鹃下降趋势较为明显,分别下降了 56.98% 和 57.18%;在两个海拔地区白花杜鹃均具有最高的花青素含量,锦绣杜鹃在高海拔处花青素含量最低,而鹿角杜鹃在低海拔处花青素含量最低。

### 2.4 不同海拔高度下 5 种杜鹃叶片丙二醛含量的差异

如图 4 可知,高海拔条件下猴头杜鹃叶片丙二醛含量最高,低海拔条件下锦绣杜鹃叶片具有最高的丙二醛含量。鹿角杜鹃在两个海拔栽培地下丙二醛含量均较低,且随海拔变化呈现显著性差异

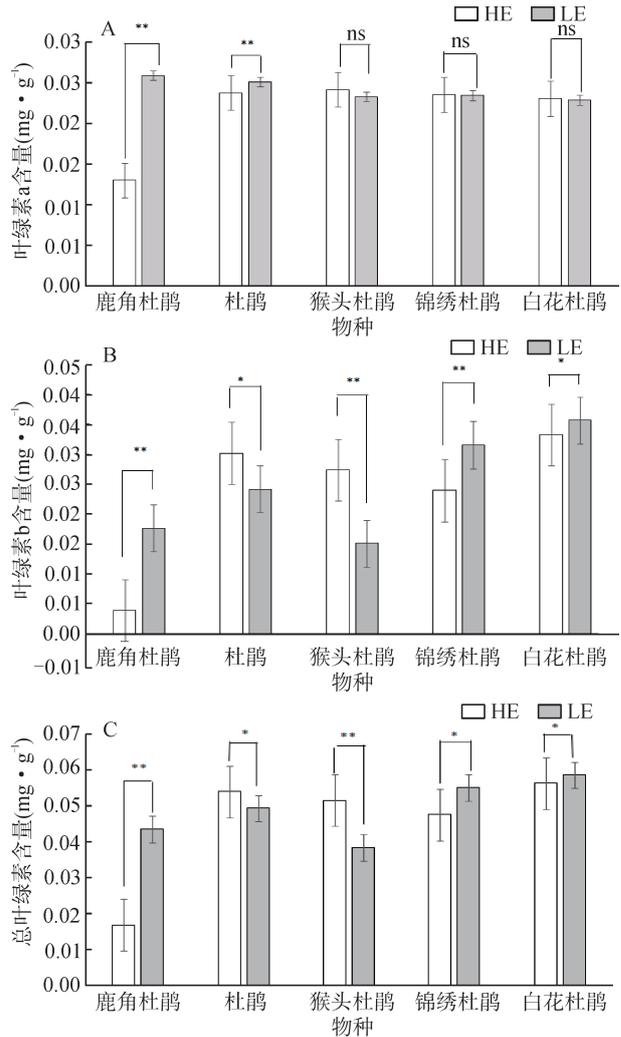


图 2 不同海拔梯度 5 种杜鹃花属植物叶片色素含量比较

Fig. 2 Comparison of leaf chlorophyll content of the five species of *Rhododendron* at different altitudes

注:\*代表差异显著( $P < 0.05$ ),\*\*代表差异极显著( $P < 0.01$ ),ns代表差异不显著。下同。

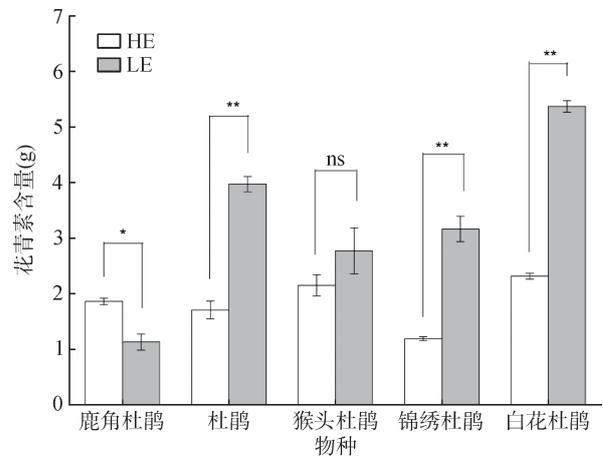


图 3 不同海拔梯度 5 种杜鹃花属植物叶片花青素含量比较

Fig. 3 Comparison of leaf anthocyanin content of the five species of *Rhododendron* at different altitudes

( $P < 0.05$ )。不同海拔高度下,5种杜鹃花丙二醛含量变化趋势不同,其中白花杜鹃、锦绣杜鹃和杜鹃随海拔高度的升高呈降低的趋势,且锦绣杜鹃降幅最为明显,为34.07%。而猴头杜鹃和鹿角杜鹃叶片丙二醛含量随海拔高度的增加呈升高的趋势,且鹿角杜鹃升幅最为显著,达58.60%。

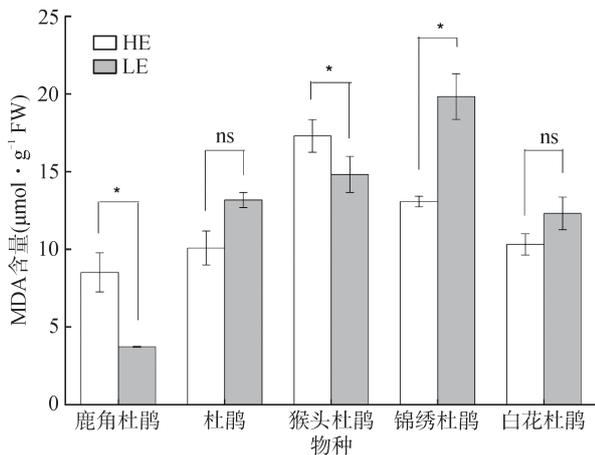


图4 不同海拔梯度5种杜鹃花属植物叶片丙二醛含量比较  
Fig. 4 Comparison of leaf MDA content of the five species of *Rhododendron* at different altitudes

### 3 讨论

近年来,全球气候变化呈现出变暖趋势,且逐渐增强,部分陆生植物的适宜生境遭到一定程度的破坏,进而使其处于濒临死亡或灭绝的境地。因此,加强对植物抗逆性研究以及迁地栽培研究工作显得尤为重要。研究表明,海拔是植物生长较为重要的地形因素,因为海拔梯度的变化通常伴随着温度、湿度、土壤和光照以及植物形态、生物量、叶面积、气孔密度、光合作用潜力等的变化;而温度的高低、光照时间长短以及土壤含水量的多少又会影响植物生长发育<sup>[13-14]</sup>。因此随着海拔的升高,植物通常会表现出矮化、生育期延长等表观变化。同时,植物体内的生理调节物质含量和组织结构也会发生变化以应对生境温度下降、紫外辐射增强、高温干旱等不利环境条件<sup>[15]</sup>。5种杜鹃花在低海拔栽培地下叶片长宽比、光合色素含量、花青素含量、丙二醛含量差异是植物适应不同海拔地区温度、光照强度、光照时间以及水分等环境条件的具体表现。

#### 3.1 叶片长宽比响应海拔变化的适应性生长机制

叶片是植物暴露在空气中感受环境变化的主要器官,不同环境下具有不同的适应性生长机制。

叶片所表现出的性状与植物对环境的响应密切相关,如叶片大小、长宽比等指标可直观反映出植物对气候变化的响应,因此植物叶片的性状与气候环境变化的响应紧密相关<sup>[16-17]</sup>。

通过测量分析5种杜鹃花叶片长宽比,发现猴头杜鹃、杜鹃叶片长宽比与海拔呈现负相关性,随海拔的升高而降低。而白花杜鹃、锦绣杜鹃、鹿角杜鹃的叶片长宽比则随海拔升高而呈现升高的趋势。5种杜鹃花叶片长宽比在不同海拔高度条件下未表现出较明显的整体变化差异,可能是由于其存在种间特异性从而使其形成各自适应海拔变化的一种适应性生长机制。

#### 3.2 光合色素含量变化响应海拔变化的适应性生长机制

光合色素含量变化随海拔升高整体上呈现出下降的趋势,这与欧洲冷杉(*Abies alba* Mill.)、直齿荆芥(*Nepeta pannonica* L.)及天女木兰[*Magnolia sieboldii* (K. Koch) N. H. Xia & C. Y. Wu]的叶绿素含量随海拔高度变化趋势研究结果相同<sup>[18-19]</sup>。推断可能的原因在于随着海拔高度升高,植物体通过抑制叶绿素a、叶绿素b的含量在一定程度上抑制了植物的净光合速率,从而减少光的吸收以适应在高海拔条件下的高紫外线辐射,进而对叶片起到保护作用<sup>[20]</sup>。

#### 3.3 花青素含量变化响应海拔变化的适应性生长机制

研究表明,花青素是一类广泛存在于植物中的水溶性天然色素,属黄酮类化合物,多以糖苷的形式存在,也称花色苷。光质、光强、温度、水分均可影响植物体内花色苷的形成。光照越强,花色苷积累越多,且蓝光、紫外光均是促进花色苷合成的有效光质,低温和干旱均利于花色苷的合成<sup>[21]</sup>。同时,花青素具有较强的抗氧化作用,植物体内花青素的积累在一定程度上表征了植物所受到的胁迫程度<sup>[21]</sup>。本研究发现花青素含量随海拔梯度的升高整体呈现减少的趋势,究其原因可能是低海拔条件下供试杜鹃花受到的胁迫相较于高海拔的影响更大。如高温、干旱、高光强等因素促进了低海拔地区杜鹃花叶片花青素积累,从而使低海拔地区杜鹃花叶片颜色更为鲜艳,更具观赏价值。这与欧洲冷杉、直齿荆芥及天女木兰的类黄酮含量随海拔高度变化趋势研究结果相符<sup>[18-19]</sup>。

### 3.4 丙二醛含量变化响应海拔变化的适应性生长机制

本研究中白花杜鹃、锦绣杜鹃、杜鹃叶片丙二醛含量随海拔梯度的变化呈现负相关性,随海拔的升高而降低。究其原因,可能是在高海拔条件下白花杜鹃、锦绣杜鹃和杜鹃受到的胁迫少于低海拔地区,如在高海拔地区面临高温干旱等非生物胁迫相对降低,从而使其体内丙二醛含量的积累减少。而在低海拔条件下,高温促使植物体内脂质过氧化水平升高,从而导致植物体内丙二醛含量升高。鹿角杜鹃和猴头杜鹃丙二醛含量则随海拔升高而呈现升高的趋势。究其原因,可能是高海拔条件下鹿角杜鹃和猴头杜鹃受到的胁迫大于其在低海拔地区受到的胁迫,如高海拔条件下植物受到的紫外线辐射相对增强,从而使其体内丙二醛含量的积累增多。由此可推测,高温干旱等生态因子可能是影响白花杜鹃、锦绣杜鹃和杜鹃生境分布的主导生态因子;而高紫外线辐射等生态因子可能是影响猴头杜鹃和鹿角杜鹃生境分布的主导生态因子。总之,植物体内丙二醛含量的变化是植物适应环境的一种生理机制。

## 4 结论

随着海拔变化,不同植物物种叶片表现出不同生理特征参数,这些参数共同反映了其对环境的适应性。珙桐(*Davidia involucreta* Baill.)叶片光合色素含量随海拔升高而降低,游离脯氨酸含量随海拔升高而增高<sup>[22]</sup>;山东银莲花[*Anemone shikokiana* (Makino) Makino]叶片腹面表皮毛的长度、气孔相对开度都随海拔的升高而明显减小,而叶片厚度、比叶面积、气孔指数等未表现出明显的规律性<sup>[23]</sup>。三种竹子叶长、叶宽、叶面积、比叶面积、维管束长宽均与海拔呈显著的负相关,叶片厚度与海拔呈正相关<sup>[24]</sup>。而对玉龙雪山草血竭(*Polygonum paleaceum* Wall. ex Hook. f.)研究则发现主脉中维管束的长度和宽度均与海拔呈正相关关系<sup>[25]</sup>。总之,植物通过形态结构与生理代谢之间的变化来适应环境因素的变化。因此,掌握不同杜鹃属植物对不同海拔地区环境的适应性规律具有重要的意义。本研究通过统计分析5种杜鹃花属植物的叶片长宽比、光合色素含量、花青素含量、丙二醛含量差异及其与海拔之间的关系,初步探究了杜鹃花属植物在低海

拔地区的形态、生理适应性响应机制。研究发现5种杜鹃花属植物对高海拔地区弱光、强辐射和低海拔地区高温、干旱等生境均具有一定的适应性。这为今后高山杜鹃的低海拔适应性栽培以及为增加城市园林绿化树种的多样性提供了参考依据,有利于提高不同海拔高度的植物物种多样性。同时也为其他高山植物的物种保育和引种驯化提供了理论依据。但植物适应环境胁迫的响应机制是一个统一的整体,需要从形态、生理、生化及分子等诸多方面做进一步的研究,从而更加全面地探究其生长发育的动态规律和意义。

### 参考文献:

- [1] Lu T, Meng Z J, Zhang G X, et al. Sub-high temperature and high light intensity induced irreversible inhibition on photosynthesis system of tomato plant (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 365.
- [2] 中国植物志编委会. 中国植物志(第57卷第1分册)[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 14.
- [3] 程洁婕, 李美君, 袁桃花, 等. 中国野生杜鹃花属植物名录与地理分布数据集[J]. 生物多样性, 2021, 29(9): 1175-1180.
- [4] 崔梦伟, 张士佳, 沈风娇, 等. DELTA系统在资源植物研究中应用的两个案例[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41(7): 66-71.
- [5] 杨涛, 尹志坚, 李新辉. 生态因子对大理苍山种子植物多样性分布格局的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(5): 66-74.
- [6] Zhang L, Yang L, Shen W. Dramatic altitudinal variations in leaf mass per area of two plant growth forms at extreme heights [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105890.
- [7] 郭文文, 卓么草, 方江平, 等. 藏东南色季拉山薄毛海绵杜鹃叶解剖结构特征与环境适应性[J]. 西北植物学报, 2020, 40(5): 811-818.
- [8] Rita T, Renato G, Camilla W. Intraspecific functional differences of subalpine plant species growing in low-altitude microrefugia and high altitude habitats [J]. *Plant Ecology*, 2020, 221: 155-166.
- [9] 李晓花, 唐山, 王凯红, 等. 庐山植物园杜鹃花资源及其在庐山风景区的应用[J]. 生态科学, 2017, 36(3): 121-129.
- [10] 肖和忠, 肖啸, 张吉军, 等. 红叶桃花青苔和叶绿素年变化规律研究[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(9): 38-39, 48.
- [11] 李小芳. 植物生理学实验指导(第5版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 1-292.
- [12] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术(第2版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1-296.
- [13] 卢存福, 贲桂英. 高海拔地区植物的光合特性[J]. 植物学通报, 1995, 2: 38-42.
- [14] 刘文华. 不同海拔高度对植物烟株生长的影响[J]. 农业与技

