



### 珍稀植物银粉蔷薇叶功能性状对环境变化的响应

俞群, 高伟, 施家意, 傅成杰, 林国江, 康天琪, 邱敏

#### 引用本文:

俞群,高伟,施家意,傅成杰,林国江,康天琪,邱敏. 珍稀植物银粉蔷薇叶功能性状对环境变化的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(6): 705–714.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4787>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 黔中喀斯特9种木质藤本叶功能性状研究

Studies on Leaf Functional Traits of Nine Woody Lianas in the Karst Area of Central Guizhou Province

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 455–464 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4328>

#### 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

Response of Leaf Functional Traits of Shrubs to Altitude in *Rhododendron latoucheae* Communities in Mt. Jinggangshan, Jiangxi, China

热带亚热带植物学报. 2019, 27(2): 129–138 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3930>

#### 乐昌含笑不同家系的叶形态与生长差异分析

Analysis of Leaf Morphology and Growth Differences among *Michelia chapensis* Families

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 503–508 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4331>

#### 基于植物功能性状的生态学研究进展:从个体水平到全球尺度

Plant Functional Traits: From Individual Plant to Global Scale

热带亚热带植物学报. 2019, 27(5): 523–533 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4108>

#### 金马河温江段河岸带不同生境植物物种多样性与土壤理化性质的动态变化

Dynamic Changes in Plant Diversity and Soil Physical and Chemical Properties in Different Habitats in Wenjiang Section of Jinma River

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 1–8 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4237>

向下翻页, 浏览PDF全文

# 珍稀植物银粉蔷薇叶功能性状对环境变化的响应

俞群<sup>1</sup>, 高伟<sup>1\*</sup>, 施家意<sup>2</sup>, 傅成杰<sup>1</sup>, 林国江<sup>1</sup>, 康天琪<sup>2</sup>, 邱敏<sup>2</sup>

(1. 福建林业职业技术学院林学系, 森林生态与碳汇计量研究所, 福建 南平 353000; 2. 南平茫荡山国家级自然保护区管理处, 福建 南平 353000)

**摘要:** 叶功能性状可以反映植物对环境的适应策略。该文选择福建省延平区不同海拔高度上的 6 个野生银粉蔷薇(*Rosa anemoniflora*)群落, 基于样方调查, 采用变异系数(CV)、Pearson 相关分析和冗余分析研究了环境因子对银粉蔷薇叶功能性状的影响。结果表明, 银粉蔷薇群落生境异质性强, 不同环境土壤因子的 CV 为 9.44%~122.28%, 土壤 pH 的变异程度最小, 土壤有效磷的变异程度最大。不同环境土壤因子指标间的差异显著, 中海拔地区土壤 pH、有机质、全量氮磷钾和速效氮磷钾含量较高, 土壤化学计量较低, 高海拔地区的土壤含水率和土壤化学计量比最高。不同环境中银粉蔷薇叶功能性状的 CV 为 2.49%~97.58%, 其中叶片含水率的变异程度最小, 比叶重的变异程度最大, 随着海拔的升高, 银粉蔷薇叶的磷、钾、钙、镁含量呈增加趋势, 说明叶功能性状多样性丰富, 对异质生境具有较强适应性。Pearson 相关分析表明, 银粉蔷薇叶的干物质含量与钙含量呈显著正相关, 钾和镁含量呈负相关, 高海拔地区银粉蔷薇可通过提高钾、钙、镁的吸收来增加植株抗逆性, 以应对生境变化。冗余分析表明, 土壤速效钾和含水率是银粉蔷薇叶功能性状随环境变化的主要驱动因子。这表明银粉蔷薇叶片通过功能性状变异和性状组合来适应海拔高度和生境的变化, 通过研究银粉蔷薇叶功能特征及与环境因子的关系, 有助于理解小尺度环境变化对植物变异的影响, 为银粉蔷薇野生资源的保育、开发和遗传改良研究等提供理论指导。

**关键词:** 银粉蔷薇; 叶功能性状; 环境; 海拔; 冗余分析

doi: 10.11926/jtsb.4787

CSTR:33235.14.jtsb.4787

## Response of Leaf Functional Traits of Rare Plant *Rosa anemoniflora* to Environmental Changes

YU Qun<sup>1</sup>, GAO Wei<sup>1\*</sup>, SHI Jiayi<sup>2</sup>, FU Chengjie<sup>1</sup>, LIN Guojiang<sup>1</sup>, KANG Tianqi<sup>2</sup>, QIU Min<sup>2</sup>

(1. Institute of Forest Ecology and Carbon Sink Measurement, Department of Forestry, Fujian Forestry Vocational Technical College, Nanping 353000, Fujian, China; 2. National Nature Reserve of Mangdang Mountain of Fujian Province, Nanping 353000, Fujian, China)

**Abstract:** Leaf functional traits can reflect the adaptation strategies of plant to environment. Based on the sample survey, six wild *Rosa anemoniflora* communities at different altitude in Yanping District, Fujian Province were selected to study the effects of environment factors on leaf functional traits by using coefficient of variation, Pearson correlation analysis and redundancy analysis. The results showed that the habitat heterogeneity of *R. anemoniflora* communities was strong, the CV of soil factors under different environment ranged from 9.44% to 122.28%, among which soil pH was the smallest, and soil available phosphorus content was the largest. There are significant differences among soil factor indexes under different environment. The soil pH, contents of organic matter, total nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) and available nitrogen (AN), phosphorus (AP) and potassium (AK) were high in the middle altitude areas, and the soil stoichiometric ratio was low, while the soil

收稿日期: 2023-03-18 接受日期: 2023-07-20

**基金项目:** 福建省林业科学技术研究项目(2024FKJ30); 中央财政林业改革发展资金(闽财资环指[2021]31); 南平市自然科学基金项目(N2021J011); 福建林业职业技术学院横向课题(2022062); 福建林业职业技术学院校科研平台基本运行经费资助

This work was supported by Fujian Forestry Science and Technology Research Project (2024FKJ30), the Central Finance Forestry Reform and Development Fund of China (Grant No. [2021]31), the Project for Natural Science in Nanping (Grant No. N2021J011), the Project of Fujian Forestry Vocational Technical College (Grant No. 2022062), and the Project for Basic Operation of Scientific Research Platform of Fujian Forestry Vocational Technical College.

作者简介: 俞群(1991年生), 男, 硕士, 讲师, 主要从事林木种质资源研究。E-mail: 191272711@qq.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gao01271@163.com

moisture content and soil stoichiometric ratio were the highest in the high altitude areas. Under different environment, the *CV* of leaf functional traits of *R. anemoniflora* ranged from 2.49% to 97.58%, among which leaf water content was the smallest, and the specific leaf weight was the largest. Along the altitude, the contents of P, K, calcium (Ca) and magnesium (Mg) in leaves showed an increasing trend, indicating that the diversity of leaf functional traits was abundant, and had strong adaptability to heterogeneous habitats. Pearson correlation analysis showed that the dry matter content was significantly positively correlated with Ca content in leaves, and the contents of K and Mg were negatively correlated with C/N and N/P in leaves. *Rosa anemoniflora* at high altitude could increase stress resistance by improving the absorption of K, Ca and Mg to cope with habitat changes. The redundancy analysis showed that soil AK and water content were the main driving factors of leaf functional trait change with environment. Therefore, it was suggested that the leaf of *R. anemoniflora* adapted to the changes of altitude and habitat through functional trait variation and trait combination. The study on the functional traits of *R. anemoniflora* leaves and their relationship with environment factors would help to understand the impact of small-scale environmental changes on plant variation, and provide theoretical guidance for the conservation, development and genetic improvement of wild resources of *R. anemoniflora*.

**Key words:** *Rosa anemoniflora*; Leaf functional trait; Environment; Altitude; Redundancy analysis

植物功能性状是植物生长发育过程中对外界环境长期适应与进化后所形成的生理、形态和物候特征<sup>[1-2]</sup>, 可反映植物的生存、生长和繁殖策略, 不仅影响生态系统功能, 还能将环境、植物和生态系统过程紧密联系起来<sup>[3-5]</sup>, 是理解植物外在表型差异和内在生理动态随环境变化的关键<sup>[6]</sup>。叶片是植物与环境接触面积最大的功能器官, 与植物碳同化和环境资源利用联系紧密, 其表型可塑性强, 对环境变化敏感, 性状易测量, 常用于反映植物的物质投资和资源分配方式, 表征植物与环境的关系<sup>[7-9]</sup>。近年来, 随着对全球气候变化关注度的提高, 植物叶片功能性状与环境条件(气候条件、土壤养分、海拔高度)的响应关系成为研究热点<sup>[10-11]</sup>。已有研究表明, 不同物种的生活史策略存在巨大差异, 其种内性状对环境条件变化的响应程度也并不相同<sup>[1]</sup>。因此, 探明特定植物叶功能性状与环境因子的关系, 对于深入理解环境因子在驱动物种内性状变异方面的贡献, 制定合理的资源保育和经营策略具有重要意义。

在小尺度范围内, 植物叶功能性状主要受地形和土壤等环境因子影响<sup>[1]</sup>, 其中海拔作为关键地形因子, 在小空间范围引起的水热分配差异是研究植物叶片性状对环境响应的天然实验室<sup>[12]</sup>。气候条件沿海拔高度迅速变化, 坡度、坡向和土壤等分布不均进一步加剧了生境的空间异质性<sup>[1,13]</sup>, 使以海拔为主导的空间环境变化与植物叶性状的响应关系成为近年来备受关注的科学问题。研究表明, 广泛

分布于不同环境梯度的物种具有根据当地环境条件调整叶片性状的巨大能力<sup>[14]</sup>, 研究不同海拔梯度上相同植物的叶功能性状可以准确反映其对环境改变的适应策略。福建省地处南亚、中亚热带气候区的交迭地带, 境内武夷山、戴云山两大山脉的屏障及台湾海峡暖流作用, 形成地形复杂、雨量充沛的地理环境, 蕴育着极其丰富的植物资源, 特别是随着全省自然保护区网络建设逐步完善, 原生性森林生态系统得到很好的保护, 次生性森林生态系统也逐渐趋于稳定, 为物种多样性保育提供了极佳的生境<sup>[15]</sup>, 为开展环境因子对植物功能性状的影响研究, 阐明不同环境条件下植物的物质投资和资源分配能力提供了绝佳条件。

银粉蔷薇(*Rosa anemoniflora*)是蔷薇科(Rosaceae)蔷薇属攀援小灌木, 为福建省特有珍稀植物, 目前仅在延平区及将乐、泰宁、古田等地有发现, 且生长在海拔 300~1 000 m 的山坡、荒地、路旁、河边等处, 生境脆弱, 范围狭窄。野外调查发现银粉蔷薇存活数量较少, 属于典型极小种群, 因居群和个体数量低而濒临灭绝, 2021 年被《世界自然保护联盟濒危物种红色名录》(IUCN)列为近危(NT), 并被《国家重点保护野生植物名录》收录为二级保护植物。银粉蔷薇除具有观赏性外, 还可作为重要的基因资源用于蔷薇属植物种质资源的拓宽和遗传改良, 科研价值极高。然而目前对该种群的研究几乎空白, 其资源分布、生长情况及濒危机制等均未见报道, 限制了对该物种资源的保护和利用。鉴于此,

本研究选择福建省延平区不同环境下的 6 个野生银粉蔷薇群落, 研究其叶片功能性状和环境因子的相关性, 以探究银粉蔷薇对异质环境的适应机制和响应策略, 并揭示银粉蔷薇种内性状变异的主要影响因素, 量化环境因子在驱动植物种内性状变异方面的贡献, 为理解小尺度上环境变化对植物变异的影响, 为珍稀野生植物资源的保育、开发和适生环境选择提供理论参考。

## 1 研究区概况

研究区域位于福建省延平区(117°50'~118°40' E, 26°51'~26°52' N), 为中亚热带季风气候, 年平均气温 19.3 °C, 极端最高温度 41 °C, 极端最低温度 -5.8 °C, 年均降水量 1 616.1 mm, 常年相对湿度 78%, 年均日照时数 1 733.3 h, 年均霜期为 69.8 d, 区内地形复杂多样, 水热条件、山地土壤垂直差异较为明显。土壤主要类型有山地红壤、山地黄壤、

山地黄红壤、山地草甸土。地带性植被类型为中亚热带常绿阔叶林。

## 2 材料和方法

### 2.1 资源分布调查

通过阅读相关书籍和文献资料, 咨询分类专家和植物爱好者, 聘请向导对银粉蔷薇在延平区的分布区域进行实地考察。在典型区域设置样方, 由于银粉蔷薇种群数量稀少, 野外分布范围较窄, 调查中共选择 6 个分布小区, 分别为低海拔的新田湾村 I 和新田湾村 II、中海拔的东山前村和上际村、高海拔的谢地村和前洋村(表 1), 土壤类型均为山地红壤。在每个小区的银粉蔷薇集中分布点各设置 3 个样方(10 m×10 m), 共 18 个调查样方。记录地理位置、海拔高度、郁闭度、坡位、土壤类型等, 用地质罗盘仪测定坡度, 并拍照记录生境原貌, 对样方内的植物种类组成、数量、群落结构层次等予以重点调查。

表 1 银粉蔷薇群落信息及生境类型

Table 1 Information and habitat types of *Rosa anemoniflora* community

地点 Location	生境特点 Habitat characteristics	个体数 Number of individuals	郁闭度 Canopy closure	坡度 Slope (°)	坡位 Slope position	坡向 Slope aspect	海拔 Height (m)	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude
新田湾村 I Xintianwan Village I	毛竹林	45	0.7	20	中坡位	西北	350	118°2'23.20"	26°37'19.01"
新田湾村 II Xintianwan Village II	毛竹林	21	0.6	6	中坡位	西北	350	118°2'22.33"	26°37'17.22"
东山前村 Dongshanqian Village	毛竹林	57	0.4	5	中坡位	西北	450	118°2'35.99"	26°37'9.75"
上际村 Shangji Village	毛竹林	27	0.2	10	中坡位	北	450	118°7'32"	26°46'44"
谢地村 Xiedi Village	杂灌林	111	-	30	中坡位	西	800	118°4'19.04"	26°41'2.45"
前洋村 Qianyang Village	毛竹林	54	0.5	40	中坡位	西北	850	118°3'9.09"	26°36'37.74"

### 2.2 银粉蔷薇生长及叶功能性状测定

测量样方中每株银粉蔷薇的地径、茎长等, 并分别随机采集 100 片健康完整的成熟叶片装入自封袋, 带回实验室测定鲜重并用扫描仪(CanoScan LiDE 220)进行扫描, 获取所有叶片图像后采用 Image J 1.8.0 软件测定叶片面积、周长、叶宽、叶长等功能性状, 然后将各样方的叶片分别置于鼓风干燥箱内 80 °C 烘 48 h, 测量叶片干重和含水率, 将烘干的叶片粉碎测定碳、氮、磷、钾、钙、镁含量。叶片功能性状包括叶形指数(LI)、比叶面积(SLA)、叶干物质含量(LDMC)、比叶重(SLW)、含水量(LWC)和碳(LCC)、氮(LNC)、磷(LPC)、钾(LKC)、钙(LCaC)、镁(LMgC)含量, 其中, LI=叶长/叶宽, SLA (cm<sup>2</sup>/g)=叶面积/叶干重, LDMC (g/kg)=叶干重/叶鲜

重, SLW (g/cm<sup>2</sup>)=叶干重/叶面积, LWC (%)=(叶鲜重-叶干重)/叶鲜重×100%, LCC (g/kg)=叶全碳/叶干重, LNC (g/kg)=叶全氮/叶干重, LPC (g/kg)=叶全磷/叶干重, LKC (g/kg)=叶全钾/叶干重, LCaC (g/kg)=叶全钙/叶干重, LMgC (g/kg)=叶全镁/叶干重<sup>[5,16-18]</sup>。

### 2.3 环境因子测定

样方调查的同时, 采用环刀法测定表层土壤(0~20 cm)容重。调查结束后, 在银粉蔷薇根际周边 10~20 cm 范围内, 用内径为 5 cm 的钢管分别采集 0~20 cm 土壤样品, 混合后带回实验室, 取 100 g 自然风干, 粉碎后过 0.149 mm 筛, 测定土壤 pH、全碳、全氮、全磷、全钾、有效氮、速效钾、有效磷含量; 另称取 100 g 土壤置于鼓风干燥箱内 105 °C

烘 24 h, 测定含水率。

植物和土壤全碳和全氮含量采用碳氮元素分析仪测定, 全磷和有效磷采用钼锑抗比色法, 土壤 pH 采用水土比 2.5:1 浸提后用酸度计测定, 土壤碱解氮采用扩散法, 全钾和速效钾采用火焰光度法, 植物钙镁含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP-OES 测定, 每个指标均 3 次重复。

## 2.4 数据的统计分析

采用 Excel 2010 进行数据整理和图表制作; 采用变异系数(coefficient of variation, *CV*)评判不同环境条件下银粉蔷薇性状指标和土壤因子的变异程度; 在 SPSS 22.0 中进行单因素方差分析和 Pearson 相关分析, 在方差分析的基础上采用 Duncan 多重比较法检验不同环境条件银粉蔷薇性状指标和环境因子的差异性; 在 Canoco 5.0 中进行冗余分析(redundancy analysis, RDA)判定环境因子对银粉蔷薇性状指标的影响。

## 3 结果和分析

### 3.1 不同环境条件土壤因子差异

从土壤因子的变异系数可见(表 2), 不同环境下各土壤因子的 *CV* 为 9.44%~122.28%, 以土壤 pH 的变异程度最小, 土壤有效磷的最大。单因素方差分析表明, 不同环境下银粉蔷薇群落的土壤理化性质存在显著差异, 其中高海拔谢地村的土壤含水率最

高, 容重最低, 其次为中海拔上际村, 其他环境条件的土壤含水率和容重无显著差异。中海拔土壤的 pH 较高, 低海拔的较低。中海拔东山前村的土壤有机质、全量氮磷钾和速效氮磷钾含量均较高, 其中有效磷和速效钾含量极显著高于其他样方。中海拔上际村的土壤全氮、全磷和碱解氮含量也高于低海拔和高海拔样方。高海拔除前洋村土壤全钾含量较高外, 其他养分含量均与低海拔持平。从土壤的化学计量特征可见, 高海拔前洋村的土壤碳氮比、碳磷比和氮磷比均最高, 中海拔除东山前村土壤碳氮比较高外, 其他样方的化学计量指标均处于较低水平。

### 3.2 不同环境叶片功能性状差异

从表 3 可见, 不同环境下银粉蔷薇叶片功能性状指标的 *CV* 为 2.49%~97.58%, 以叶片含水率的变异程度最小, 比叶重的最大。低海拔和高海拔样方银粉蔷薇的平均地径、茎长、叶长、叶宽、叶周长、叶面积、叶干物质含量等均高于中海拔, 以高海拔最为显著。比叶面积以中海拔东山前村最高, 比叶重以中海拔上际村最高。不同环境下叶片的含水率和碳含量无差异。除新田湾 II 样方内叶氮含量较低外, 其他样方均无显著差异。随着海拔的升高, 叶片磷、钾、钙、镁含量呈增加趋势, 而化学计量比则呈下降趋势, 高海拔地区的叶片磷、钾、钙、镁含量普遍较高, 中低海拔地区的不同程度的低于高海拔, 而低海拔地区的叶片碳氮比、碳磷比、氮磷

表 2 银粉蔷薇群落的土壤因子

Table 2 Difference of soil factors in *Rosa anemoniflora* community under different environmental conditions

土壤因子 Soil factor	新田湾村I Xintianwan Village I	新田湾村II Xintianwan Village II	东山前村 Dongshanqi an Village	上际村 Shangji Village	谢地村 Xiedi Village	前洋村 Qianyang Village	<i>CV</i> /%
含水率 Water content /%	19.93c	19.69c	21.14c	26.42b	38.69a	21.27c	29.25
容重 Unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.06a	1.06a	1.04a	0.91ab	0.81b	1.039a	12.37
pH	5.38c	5.64b	6.12a	5.67b	6.35a	5.93a	9.44
有机质 Organic matter (g/kg)	59.20b	41.70c	82.10a	53.30b	31.10c	56.30b	31.14
全氮含量 Total nitrogen content (N, g/kg)	2.56b	1.86c	3.21a	3.22a	1.59c	2.05bc	28.17
全磷含量 Total phosphorus content (g/kg)	0.58b	0.52b	0.92a	0.85a	0.43c	0.34c	36.72
全钾含量 Total kalium content (g/kg)	24.20b	21.50bc	30.50ab	18.40c	25.70b	37.20a	25.30
碱解氮含量 Alkaline nitrogen content (mg/kg)	335.00b	222.00bc	515.00a	401.00ab	182.00c	230.00bc	38.97
有效磷含量 Available phosphorus content (mg/kg)	1.00b	1.90b	16.60a	3.90b	1.10b	3.20b	122.28
速效钾含量 Available kalium content (mg/kg)	99.00b	90.00b	134.00a	76.00b	72.00b	56.00c	29.99
C/N	23.13b	22.42b	25.58a	16.55c	19.56b	27.46a	18.25
C/P	102.07b	80.19c	89.24c	62.71d	72.33c	165.59a	37.30
N/P	4.41b	3.58b	3.49b	3.79b	3.70b	6.03a	23.16

同行数据后不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下同

Data followed different letters at the same line indicate significant differences at 0.05 level. The same below

比则不同程度的高于中高海拔。

### 3.3 叶片功能性状间的相关性

Pearson 相关分析表明(表 4), 叶面积、叶周长、

叶长、叶宽间均呈显著正相关。叶干物质含量与含水率和叶碳含量呈显著负相关, 与叶钙含量呈显著正相关。比叶重与比叶面积呈显著负相关。

表 3 银粉蔷薇的功能性状

Table 3 Functional traits of *Rosa anemoniflora*

功能性状 Functional trait	新田湾村I Xintianwan Village I	新田湾村II Xintianwan Village II	东山前村 Dongshanqian Village	上际村 Shangji Village	谢地村 Xiedi Village	前洋村 Qianyang Village	CV /%
平均地径 Average diameter (mm)	4.78a	4.17ab	3.91b	3.28b	4.77a	4.47ab	13.62
平均茎长 Average stem length (m)	0.84bc	0.75c	1.1ab	0.96b	1.43a	1.21a	23.93
叶长 Leaf length (cm)	4.11a	2.58b	2.17bc	1.63c	4.04a	4.04a	35.61
叶宽 Leaf width (cm)	1.03ab	0.99ab	0.93b	0.49c	1.35a	1.15a	28.53
叶形指数 Leaf shape index	4.03a	2.61c	2.34c	3.28b	3.00b	3.53ab	19.74
叶周长 Leaf circumference (cm)	9.38a	6.23b	5.62b	3.78c	9.27a	9.13a	32.66
叶面积 Leaf area (cm <sup>2</sup> )	3.24b	2.10c	1.68d	0.63e	4.23a	3.51ab	51.83
比叶面积 Specific leaf area (cm <sup>2</sup> /g)	202.53b	233.48b	280.92a	42.35d	184.23c	175.60c	43.08
叶干物质含量 Leaf dry matter content (g/kg)	390.24b	409.09ab	375.00b	384.62b	389.83b	434.78a	5.41
比叶重 Specific leaf weight (g/cm <sup>2</sup> )	0.00b	0.00b	0.00b	0.02a	0.01b	0.01b	97.58
含水率 Water content /%	60.82a	59.44a	60.71a	61.06a	61.87a	57.64a	2.49
叶碳含量 Leaf carbon content (g/kg)	571.10a	550.80a	587.90a	563.68a	566.90a	541.70a	2.86
叶氮含量 Leaf nitrogen content (g/kg)	18.73a	15.95b	18.60a	17.97ab	18.98a	17.57ab	6.22
叶磷含量 Leaf phosphorus content (g/kg)	1.17c	1.05c	1.28b	1.27b	1.54a	1.31b	12.84
叶钾含量 Leaf kalium content (g/kg)	8.43b	9.36ab	9.81ab	9.54ab	10.78a	9.34ab	8.00
叶钙含量 Leaf calcium content (g/kg)	12.21b	11.43bc	10.28c	12.96b	11.96bc	18.90a	23.50
叶镁含量 Leaf magnesium content (g/kg)	3.09c	3.48c	3.88b	3.84b	4.34a	4.43a	13.22
叶碳氮比 Leaf C/N	30.49b	34.53a	31.61b	31.37b	29.87b	30.83b	5.19
叶碳磷比 Leaf C/P	488.12ab	524.57a	459.30b	443.84b	368.12c	413.51b	12.25
叶氮磷比 Leaf N/P	16.01a	15.19a	14.53ab	14.15ab	12.32b	13.41b	9.14

表 4 银粉蔷薇叶功能性状之间的相关性

Table 4 Correlation among leaf functional traits of *Rosa anemoniflora*

性状 Trait	LA	LC	LL	LW	WC	LCC	LNC	LPC	LKC	LCaC	LMgC	LI	SLA	LDMC
LC	0.967**													
LL	0.959**	0.995**												
LW	0.941**	0.865*	0.830*											
WC	-0.097	-0.178	-0.186	-0.110										
LCC	-0.240	-0.238	-0.290	-0.151	0.729									
LNC	0.297	0.298	0.295	0.184	0.601	0.655								
LPC	0.474	0.318	0.328	0.432	0.374	0.177	0.693							
LKC	0.193	-0.056	-0.072	0.336	0.378	0.146	0.240	0.771						
LCaC	0.321	0.374	0.426	0.164	-0.767	-0.751	-0.150	0.142	-0.176					
LMgC	0.301	0.136	0.148	0.343	-0.222	-0.276	0.159	0.756	0.727	0.518				
LI	0.347	0.511	0.575	0.022	-0.120	-0.301	0.273	-0.007	-0.578	0.502	-0.225			
SLA	0.318	0.324	0.234	0.558	-0.128	0.314	-0.047	-0.184	-0.005	-0.326	-0.160	-0.442		
LDMC	0.398	0.428	0.457	0.345	-0.893*	-0.919**	-0.548	-0.150	-0.208	0.847*	0.339	0.289	-0.026	
SLW	-0.643	-0.649	-0.577	-0.806	0.236	-0.064	0.016	0.046	0.005	0.074	0.041	0.183	-0.922**	-0.227

LA: 叶面积; LC: 叶周长; LL: 叶长; LW: 叶宽; WC: 含水率; LCC: 叶碳含量; LNC: 叶氮含量; LPC: 叶磷含量; LKC: 叶钾含量; LCaC: 叶钙含量; LMgC: 叶镁含量; LI: 叶形指数; SLA: 比叶面积; LDMC: 叶干物质含量; SLW: 比叶重; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*:  $P < 0.05$ 。

LA: Leaf area; LC: Leaf circumference; LL: Leaf length; LW: Leaf width; WC: Water content; LCC: Leaf carbon content; LNC: Leaf nitrogen content; LPC: Leaf phosphorus content; LKC: Leaf kalium content; LCaC: Leaf calcium content; LMgC: Leaf magnesium content; LI: Leaf shape index; SLA: Specific leaf area; LDMC: Leaf dry matter content; SLW: Specific leaf weight; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*:  $P < 0.05$ .

### 3.4 银粉蔷薇叶功能性状与生境关系

由银粉蔷薇性状指标与土壤环境的冗余分析可见(图 1),影响银粉蔷薇生长指标的主要环境因子为土壤速效钾(贡献度 46.1%)、全磷含量(贡献度 39.8%)、全氮含量(贡献度 6.2%)、含水率(贡献度 3.9%)、全碳含量(贡献度 3.1%)和土壤有效磷(贡献度 1.0%)。影响银粉蔷薇营养指标的主要环境因子为土

壤氮磷比(贡献度 52.2%)、含水率(贡献度 21.5%)、速效钾(贡献度 11.1%)、有效磷(贡献度 9.6%)、土壤 pH (贡献度 4.5%)和土壤容重(贡献度 1.2%)。影响银粉蔷薇叶片化学计量特征的主要环境因子为土壤速效钾(贡献度 25.6%)、土壤氮磷比(贡献度 15.3%)、土壤碳氮比(贡献度 29.5%)和土壤有效氮(贡献度 4.5%)。

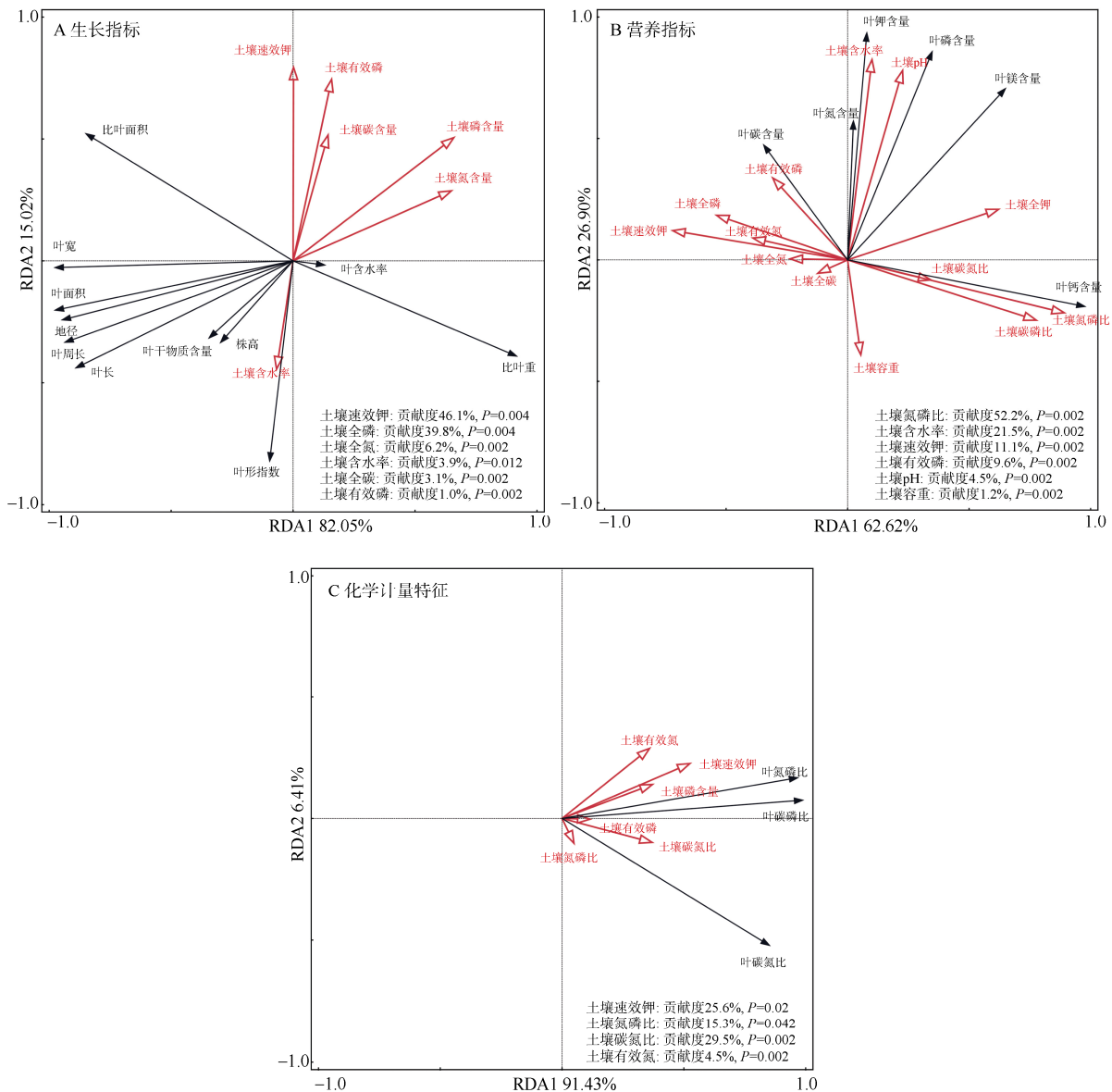


图 1 银粉蔷薇性状指标与土壤环境的冗余分析

Fig. 1 Redundancy analysis of the character indexes of *Rosa anemoniflora* and soil environment

## 4 讨论和结论

### 4.1 环境条件对银粉蔷薇叶功能性状的影响

植物叶片大小通常具有较大的形态可塑性,能

够适应不同的光合条件,保持水分供应和蒸腾需求之间的有效平衡<sup>[1,19]</sup>。本研究中,在不同环境条件下银粉蔷薇的功能性状呈明显差异,其中低海拔和高海拔地区的平均地径、茎长、叶长、叶宽、叶周

长、叶面积、叶干物质含量等均高于中海拔,以高海拔最为显著,说明银粉蔷薇叶功能性状的环境可塑性强,具备随环境条件调整叶片性状的适应策略。银粉蔷薇为喜光植物,而低海拔地区的银粉蔷薇位于郁闭度为0.6~0.7的毛竹林下,且土壤养分含量较低,为适应林内的低光照环境和贫瘠的立地条件,需要大而薄的叶片来接收光能,以便最大程度的维持光合作用;中海拔样方虽同样位于毛竹林内,但其林冠层郁闭度较小(仅为0.2~0.4),且坡度平缓,林地土壤养分含量高,在充足的光照和土壤养分条件下,银粉蔷薇叶片小而厚,从比叶重来看,中海拔上际村显著高于其他地区,与结果相符;高海拔地区因土壤坡度较大,土壤养分含量普遍较低,立地条件差,且谢地村银粉蔷薇生长于密集的杂灌之中,为适应贫瘠立地和激烈的竞争环境,需要通过增加叶长扩展叶面积来接收光能,以维持最大光合面积来应对资源的匮乏,增强对环境的利用程度。叶干物质含量反映植物获取资源的能力及防御外界的能力<sup>[5]</sup>。研究表明,植物的叶干物质含量具有较强的内稳性,不易受到其他叶片性状的限制<sup>[20-21]</sup>,本研究中,不同环境银粉蔷薇叶干物质含量的CV为5.41%,为生长指标中变异程度最小变量,与前人研究结果一致。

不同环境银粉蔷薇叶片碳、氮、钾含量的CV为2.86%~8%,说明环境条件的改变没有引起叶片碳、氮、钾含量的显著变化,但叶片磷、钾、钙、镁含量表现出随着海拔升高而增加的趋势。研究表明,植物叶片钾含量与植物维持生长、提高水分利用效率和适应低温环境有关,而钙是叶片的结构物质,磷、镁则与光合作用和叶绿素的合成关系密切<sup>[16-18]</sup>。因此,随着海拔的升高,银粉蔷薇需要提高叶片钾和钙含量适应低温环境并保证叶片的结构稳定,同时提高叶片磷和镁的含量促进叶绿素合成以抵抗低温对光合速率的限制。

植物叶片的碳氮比和碳磷比反映了植物的养分利用效率,氮磷比则反映了土壤养分的有效性<sup>[22]</sup>。叶片氮磷比还可以表示群落水平的养分限制状况,通常叶片氮磷比高于16表示磷限制,低于14表示氮限制,高于14低于16表示氮磷共同限制<sup>[23-24]</sup>。本研究中,低海拔地区的叶片碳氮比、碳磷比、氮磷比不同程度的高于中高海拔,高海拔的叶片碳磷比、氮磷比普遍较低,说明随着海拔的升高,银粉蔷薇的养分利用效率不断降低。从叶片氮磷比可以

看出,低海拔银粉蔷薇生长偏向受磷限制,中海拔受氮磷共同限制,高海拔则转为氮限制,即随着海拔的升高,银粉蔷薇的生长逐渐由磷限制向氮限制转变。

#### 4.2 叶功能性状间关系对环境变化的响应

植物可以通过各性状间的协同与权衡来适应环境的变化,并形成性状间最佳的功能组合<sup>[25]</sup>。本研究中,除叶长、叶宽、叶面积和叶周长等生长指标间呈显著相关外,银粉蔷薇叶片营养指标间大多无显著的相关性。但在不同环境条件下,银粉蔷薇叶片的干物质含量与叶片含水率和碳含量呈显著负相关,与叶片钙含量呈显著正相关,其中高海拔前洋村的银粉蔷薇叶片钙含量显著高于中低海拔。研究表明,钙参与植物体诸多生理代谢过程,在植物生长发育和适应环境过程中发挥着重要作用<sup>[26]</sup>,逆境条件下植物可调整叶片钙含量来适应生境变化<sup>[27]</sup>。刘进等<sup>[28]</sup>研究表明,在不同海拔高度上,海拔差异引起的气温变化是影响植物钙吸收能力的重要原因。柏雨萱等<sup>[29]</sup>研究表明,随着海拔的升高,栲树叶片中果胶酸钙、磷酸钙和碳酸钙及草酸钙含量协同增加,是栲树应对生境变化,增加抗逆性的重要机制。本研究中高海拔地区银粉蔷薇叶钙含量较高,说明其可通过提高钙的吸收来增加植株抗逆性,以应对生境变化。此外,由于叶片中钙的富集性强,在叶片衰老过程中的转移率低<sup>[22]</sup>,因此高叶干物质含量可能与高钙吸收率密切相关。

大量研究表明,植物叶片的氮磷钾含量一般呈显著正相关,因为氮磷钾是协同元素,通常在植物体内相互配合协调一致地完成某一生理活动<sup>[6,30-31]</sup>。本研究中,在不同海拔高度上,银粉蔷薇的叶氮磷钾含量也呈正相关,与已有研究一致。此外,银粉蔷薇叶钾和镁含量呈负相关,这可能与植物对环境条件的适应有关,海拔梯度上变化最大的环境因子是温度,随着海拔升高温度下降,植物形成相应的生存策略<sup>[11]</sup>。Reich等<sup>[32]</sup>研究表明,全球452个样点的1280种植物叶片氮磷含量都随着纬度升高和温度降低而增加,氮磷比则降低。本研究中,高海拔地区银粉蔷薇需要吸收更多的钾和镁以增加抗性应对低温环境,提高光合速率,此外,其维持正常生长还需要磷含量丰富的核糖核酸来支持蛋白质的合成,增加叶绿素含量,因此,相比于氮,其需要更多的磷提供能量,从而导致高海拔地区具有较低的叶氮磷比。



### 4.3 环境因子对银粉蔷薇叶性状的解释

已有研究表明,在单种植物分布的海拔范围内有其相对适宜的生长环境,叶特性在此范围内表现出显著的变化<sup>[30]</sup>。冗余分析表明,在不同环境条件下,银粉蔷薇生长指标与土壤养分含量多呈负相关,其中土壤速效钾含量对银粉蔷薇生长指标影响最大,土壤含水率与生长指标呈正相关。分析原因,在资源匮乏的环境条件下,银粉蔷薇为提高资源利用效率,需要从环境中吸收更多的养分元素来扩展叶面积,提高光合速率,从而导致土壤养分含量和叶化学计量比的降低,而土壤含水率的提高有利于养分的吸收和植株的生长。叶营养指标与土壤 pH、含水率、有效磷、速效钾含量多呈正相关,叶钙含量与土壤的化学计量比具有正相关性,与土壤氮磷比关系最为密切,也说明银粉蔷薇可通过提高钙的吸收来应对贫瘠的土壤环境。在叶化学计量比与土壤因子的关系中,速效钾依然具有较高的贡献度,可见,土壤速效钾和含水率是银粉蔷薇叶功能性状沿环境条件变化的主要驱动因子,随着海拔升高和环境条件改变,银粉蔷薇可调整适应策略以应对土壤养分、光照条件、温度等环境因子的变化。

综上,银粉蔷薇叶片性状具有较大的环境可塑性,其中叶片含水率的变异程度最小,比叶重的变异程度最大。不同环境条件下银粉蔷薇大部分叶性状差异显著,不同海拔高度上土壤环境因子存在显著差异。银粉蔷薇叶片功能性状通过一定的性状变异和性状组合适应海拔高度和生境条件的变化,其中显著影响叶生长性状的环境因子为土壤速效钾、全磷、全氮、全碳、含水率和土壤有效磷,影响叶营养性状的环境因子为土壤 N/P、速效钾、有效磷、含水率、土壤 pH 和土壤容重,影响叶化学计量比的环境因子为土壤速效钾、土壤氮磷比、土壤碳氮比和土壤有效氮。可见,土壤速效钾和含水率是银粉蔷薇叶功能性状沿环境条件变化的主要驱动因子。通过研究银粉蔷薇叶功能特征及与环境因子的关系,有助于理解小尺度上环境变化对植物变异的影响,为银粉蔷薇野生资源的保育、开发和开展其遗传改良等提供理论指导。

### 参考文献

- [1] LIU S W, AI Y B, LIU Y H. Variations in leaf functional traits along the altitude gradient of *Pinus tabulaeformis* and its environmental explanations in Beijing Songshan Mountain [J]. *J Beijing For Univ*, 2021, 43(4): 47–55. [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. doi: 10.12171/j.1000-1522.20200292.]
- [2] SUN M, TIAN K, ZHANG Y, et al. Research on leaf functional traits and their environmental adaptation [J]. *Plant Sci J*, 2017, 35(6): 940–949. [孙梅, 田昆, 张贇, 等. 植物叶片功能性状及其环境适应研究 [J]. *植物科学学报*, 2017, 35(6): 940–949. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2017.60940.]
- [3] MENG T T, NI J, WANG G H. Plant functional traits, environments and ecosystem functioning [J]. *J Plant Ecol*, 2007, 31(1): 150–165. [孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境 and 生态系统功能 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 150–165. doi: 10.17521/cjpe.2007.0019.]
- [4] CORNELISSEN J H C, LAVOREL S, GARNIER E, et al. Handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide [J]. *Aust J Bot*, 2003, 51(4): 335–380. doi: 10.1071/BT02124.
- [5] HE Y Q, SHI X J, CHEN G J, et al. Response and adaptation of leaf functional traits of *Eurya emarginata* to environmental factors [J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, 42(6): 2418–2429. [何雅琴, 史晓洁, 陈国杰, 等. 滨柃叶功能性状对环境因子的响应 [J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2418–2429. doi: 10.5846/stxb202101180189.]
- [6] TIAN Y L, YANG H, WANG F L, et al. Differences of leaf functional traits of *Pinus tabulaeformis* and its response to altitude gradient in the middle of Qinling Mountains [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2021, 41(2): 300–309. [田岳梨, 杨航, 王芳玲, 等. 秦岭中段山脊油松叶功能性状差异及其对海拔梯度的响应 [J]. *西北植物学报*, 2021, 41(2): 300–309. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2021.02.0300.]
- [7] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. *Nature*, 2004, 428(6985): 821–827. doi: 10.1038/nature02403.
- [8] WANG W J, LÜ H, ZHONG Y M, et al. Relationship between heteromorphic leaf traits of *Populus euphratica* and its individual development [J]. *J Beijing For Univ*, 2019, 41(2): 62–69. [王文娟, 吕慧, 钟悦鸣, 等. 胡杨异形叶性状与其个体发育的关系 [J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(2): 62–69. doi: 10.13332/j.1000-1522.20180364.]
- [9] GENG M Y, CHEN F Q, LÜ K, et al. Effects of developmental stage on the leaf functional traits of the endangered shrub species *Disanthus cercidifolius* var. *longipes* [J]. *Plant Sci J*, 2018, 36(6): 851–858. [耿梦娅, 陈芳清, 吕坤, 等. 濒危植物长柄双花木(*Disanthus cercidifolius* var. *longipes*)叶功能性状随生长发育阶段的变化 [J]. *植物科学学报*, 2018, 36(6): 851–858. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2018.60851.]
- [10] HÖLSCHER D, SCHMITT S, KUPFER K. Growth and leaf traits of

- four broad-leaved tree species along a hillside gradient [J]. *Forstw Cbl*, 2002, 121(5): 229–239. doi: 10.1046/j.1439-0337.2002.02031.x.
- [11] JIANG A P, JIANG J M, LIU J. Responses of leaf traits of *Sassafras tsumu* (Hemsl.) Hemsl. along an altitudinal gradient [J]. *Chin J Ecol*, 2016, 35(6): 1467–1474. [蒋艾平, 姜景民, 刘军. 椴木叶片性状沿海拔梯度的响应特征 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1467–1474. doi: 10.13292/j.1000-4890.201606.017.]
- [12] GRAAE B J, DE FRENNE P, KOLB A, et al. On the use of weather data in ecological studies along altitudinal and latitudinal gradients [J]. *Oikos*, 2012, 121(1): 3–19. doi: 10.1111/j.1600-0706.2011.19694.x.
- [13] SONG L L, FAN J W, WU S H. Research advances on changes of leaf traits along an altitude gradient [J]. *Prog Geogr*, 2011, 30(11): 1431–1439. [宋璐璐, 樊江文, 吴绍洪. 植物叶片性状沿海拔梯度变化研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1431–1439.]
- [14] HE N P, LIU C C, ZHANG J H, et al. Perspectives and challenges in plant traits: From organs to communities [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38(19): 6787–6796. [何念鹏, 刘聪聪, 张佳慧, 等. 植物性状研究的机遇与挑战: 从器官到群落 [J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6787–6796. doi: 10.5846/stxb201710241900.]
- [15] LIN J L. Investigation on distribution and habitat of wild *Dendrobium* in Fujian Province [J]. *For Survey Design*, 2009(2): 13–16. [林建丽. 福建省野生石斛属植物分布及生境调查研究 [J]. *林业勘察设计*, 2009(2): 13–16. doi: 10.3969/j.issn.1004-2180.2009.02.004.]
- [16] ZHANG Z K, WANG Q, WU Y H, et al. Research progress of plant functional traits based on CiteSpace [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, 40(3): 1101–1112. [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. doi: 10.5846/stxb201809172031.]
- [17] LUO D, SHI Y J, SONG F H, et al. Variation and correlation of leaf functional traits and photosynthetic characteristics of 38 hazelnut germplasm resources [J]. *Chin J Ecol*, 2021, 40(1): 11–22. [罗达, 史彦江, 宋锋惠, 等. 38 个榛种质资源叶功能性状与光合特征变异及其相关性 [J]. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 11–22. doi: 10.13292/j.1000-4890.202101.022.]
- [18] LI J P, TIAN D S, HE Y C, et al. Response and mechanism of potassium content in leaves of alpine meadow plants to multiple nutrient additions [J]. *J Beijing For Univ*, 2022, 44(4): 116–123. [李佳璞, 田大栓, 何奕成, 等. 高寒草甸植物叶片钾含量对多种养分添加的响应及机理 [J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(4): 116–123. doi: 10.12171/j.1000-1522.20210074.]
- [19] UMAÑA M N, SWENSON N G. Intraspecific variation in traits and tree growth along an elevational gradient in a subtropical forest [J]. *Oecologia*, 2019, 191(1): 153–164. doi: 10.1007/s00442-019-04453-6.
- [20] WILSON P J, THOMPSON K, HODGSON J G. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies [J]. *New Phytol*, 1999, 143(1): 155–162. doi: 10.1046/j.1469-8137.1999.00427.x.
- [21] CHEN C, LIU D H, WU J J, et al. Leaf traits of *Quercus wutaishanica* and their relationship with topographic factors in Mount Dongling [J]. *Chin J Ecol*, 2015, 34(8): 2131–2139. [陈晨, 刘丹辉, 吴键军, 等. 东灵山地区辽东栎叶性状与地形因子关系 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2131–2139. doi: 10.13292/j.1000-4890.2015.0174.]
- [22] GAO W, LIN J, HUANG S D, et al. Seasonal dynamics of leaf stoichiometry for different tree species in a coastal sand dune in subtropical China [J]. *Chin J Trop Crops*, 2018, 39(11): 2304–2312. [高伟, 林捷, 黄石德, 等. 南亚热带海岸沙地不同树种叶片化学计量学季节动态研究 [J]. *热带作物学报*, 2018, 39(11): 2304–2312. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2018.11.028.]
- [23] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *J Appl Ecol*, 1996, 33(6): 1441–1450. doi: 10.2307/2404783.
- [24] RONG Q Q, LIU J T, CAI Y P, et al. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Tamarix chinensis* Lour. in the Laizhou Bay coastal wetland, China [J]. *Ecol Eng*, 2015, 76: 57–65. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.03.002.
- [25] LIU C, WU X, WANG X P, et al. Relationships among shrub leaf traits in Inner Mongolia and comparison in different spatial scales [J]. *J Beijing For Univ*, 2012, 34(6): 23–29. [刘超, 武娟, 王襄平, 等. 内蒙古灌木叶性状关系及不同尺度的比较 [J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(6): 23–29. doi: 10.13332/j.1000-1522.2012.06.017.]
- [26] WHITE P J, BROADLEY M R. Calcium in plants [J]. *Ann Bot*, 2003, 92(4): 487–511. doi: 10.1093/aob/mcg164.
- [27] CAO J H, ZHU M J, HUANG F, et al. Comparison study on calcium forms in plant leaves under different geological backgrounds: A case study in Maolan, Guizhou Province [J]. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2011, 30(3): 251–260. [曹建华, 朱敏洁, 黄芬, 等. 不同地质条件下植物叶片中钙形态对比研究——以贵州茂兰为例 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2011, 30(3): 251–260. doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2011.03.002.]
- [28] LIU J, LONG J, LI J, et al. Differentiation characteristics of calcium bioabsorption capacity of dominant tree species with altitude in typical karst mountain area [J]. *Ecol Environ Sci*, 2021, 30(8): 1589–1598. [刘进, 龙健, 李娟, 等. 典型喀斯特山区优势树种钙吸收能力的海拔分异特征研究 [J]. *生态环境学报*, 2021, 30(8): 1589–1598. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.08.005.]
- [29] BAI Y X, LIU D P, XING Z Y, et al. Responses of contents of

- different forms of calcium in leaf of *Castanopsis fargesii* to variations of altitude gradients and soil factors [J]. *J Plant Res Environ*, 2022, 31(4): 28–36. [柏雨萱, 刘丹萍, 邢郑瑜, 等. 栲树叶片中不同类型钙含量对海拔梯度和土壤因子变化的响应 [J]. *植物资源与环境学报*, 2022, 31(4): 28–36. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2022.04.04.]
- [30] ZHANG H W, MA J Y, SUN W, et al. Altitudinal variation in functional traits of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* and their relationship to soil factors in Tianshan Mountains, northwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30(21): 5747–5758. [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.]
- [31] HU Y S, YAO X Y, LIU Y H. The functional traits of forests at different succession stages and their relationship to terrain factors in Changbai Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(20): 5915–5924. [胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山不同演替阶段森林植物功能性状及其与地形因子间的关系 [J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 5915–5924. doi: 10.5846/stxb201301230133.]
- [32] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101(30): 11001–11006. doi: 10.1073/pnas.0403588101.