

金华北山亚热带优势植物叶片解剖性状的变异

侯颖

浙江师范大学生命科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2024年3月29日; 录用日期: 2024年5月8日; 发布日期: 2024年5月15日

摘要

叶片解剖特征是指示植物对特定环境适应性的主要指标, 也是展现叶片功能及其重要程度的凭据。为研究我国东部典型亚热带常绿阔叶林优势木本植物的生态适应策略, 以金华北山为采样地, 采用叶面仪、徒手切片法和显微观察技术, 对叶片解剖结构进行测量, 分析解剖性状在种间及种内的差异, 阐释其与环境的相互关系。结果表明: 栅栏组织的厚度变异最大, 海绵组织厚度的变异最小, 且不同植物间的同一性状值大小差别较大。植物功能性状的种内、种间变化较大, 且不同性状间存在差异, TS的种内变异最高, TP及TP/TS的种内变异均较小。物种差异对TP/TS性状变异的解释度均最高, 生活型和生长型的交互作用对植物叶片性状变异的影响大于生活型和生长型的单独影响。

关键词

解剖结构, 优势植物, 性状变异, 环境适应

Variation of Leaf Anatomic Characters of Subtropical Dominant Plants in North Mountain of Jinhua

Ying Hou

College of Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Mar. 29th, 2024; accepted: May 8th, 2024; published: May 15th, 2024

Abstract

Leaf anatomical characteristics are the main indicators of plant adaptability to a specific environment, and also the evidence of leaf function and its importance. In order to study the ecological adaptation strategies of the dominant woody plants in the typical subtropical evergreen broad-leaved forest in eastern China, the leaf anatomical structure of the leaves was measured

with foliar surface analyzer, freehand slice method and microscopic observation techniques, and the differences between the anatomical traits and the environment were analyzed. The results showed that the thickness variation of palisade tissue was the largest, the thickness variation of sponge tissue was the smallest, and the value of the same trait was different among different plants. The intraspecific and interspecific variation of plant functional traits was large, and there were differences among different traits. The intraspecific variation of TS was the highest, and the intraspecific variation of TP and TP/TS was small. The interaction of life type and growth type had a greater effect on the variation of leaf traits than that of life type and growth type alone.

Keywords

Anatomical Structure, Dominant Plants, Character Variation, Environmental Adaptation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

叶片解剖性状如角质层、栅栏组织、海绵组织、气孔密度、开度和下陷深度等，不仅是植物自身保护特性的指示物，也能反映叶片内外的物质交换过程，如光合、呼吸和蒸腾作用是体现植物对环境适应的重要指标[1] [2]，可反映植物对资源的利用策略。探究某一地区不同植被类型中的植物叶片解剖性状及其变异，分析其与环境的关系，是生态学研究的传统内容，也是当前全球变化背景下植物功能性状研究不可或缺的工作。

叶片性状由物种遗传背景和环境可塑性双重因素决定[3]。研究表明，不同植物种的叶片解剖结构存在差异[4] [5] [6] [7] [8]，温度、降水、土壤元素、海拔、坡度、太阳辐射等环境因素也会导致叶片解剖结构的变异[9] [10] [11]。目前，植物功能性状的研究大多关注叶片、枝条、根系的形态性状，对其解剖性状研究较少。植物叶片解剖性状的特征能反映植物对环境的适应[12] [13] [14] [15] [16]。

叶片功能性状作为联系植物生理适应性和环境梯度间的桥梁，其厚度影响着叶片的水分供应、存储以及光合作用中物质和能量的交换过程[17] [18] [19] [20]，叶片形态性状包括可量化的形态指标如叶片大小(长、宽、周长、面积)、厚度、比叶面积，以及非量化指标如叶片形状，都与解剖性状有密切关联，且有研究发现二者间存在权衡关系，即植物在不同功能性状之间对有限资源的分配存在着互相牵制的权衡作用[21]。研究表明，分布在不同地区的大果榆(*Ulmus macrocarpa*)叶的形态和解剖特征、气孔形态和气孔密度存在差异[14]。胡杨(*Populus euphratica*)叶片随着由披针形向锯齿阔卵形变化，叶片宽度增加、表面积减小、肉质化程度提高、叶柄变长[15]，这说明叶片形态与解剖性状之间存在一定的权衡。

然而，叶片形态与解剖性状关联与权衡的研究仍然相对较少。不同环境、不同植被类型间的植物叶片形态与解剖性状是否存在关联，其关联程度是否存在区域和植被类型间的差异，二者是否存在权衡机制，这种机制在不同环境中是否存在差异，等等，这些问题都需要来自不同区域不同植被类型的证据。不同植被类型，或者不同演替阶段的植被，其优势物种的叶片解剖结构特征也存在差异。在南亚热带森林群落不同演替阶段中，针叶林及针阔叶混交林的马尾松(*Pinus massoniana*)叶厚度、叶腹及叶背角质膜厚度差异显著；从针阔叶混交林演替到季风常绿阔叶林阶段，锥栗(*Castanea henryi*)、木荷(*Schima spp.*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)叶片厚度和栅栏组织厚度等差异均显著[6]。在温带退化森林群落恢复演替的不同阶段，叶片结构表现出较大的可塑性，其中表皮角质层厚度、表皮毛密度、栅栏组织厚度、栅

海比等的可塑性最为显著[2]。

对森林与灌丛植被的植物叶片性状解剖研究通常是对不同植被类型分离研究，对森林与灌丛中不同植物的比较研究较少，而森林群落中冠层乔木与林下灌木植物叶片的解剖性状，以及森林群落与灌丛群落中的灌木植物的叶片解剖性状是否存在差异，它们对环境的响应和适应机制是否一致，尚未见报道。而这些问题的回答有助于理解不同植被类型对不同环境的生态学对策，有助于深入理解未来全球变化对生态系统的影响与反馈机制。因此，本文以浙江金华北山亚热带山地森林的优势木本植物为研究对象，测定其叶片的解剖性状与形态性状指标，分析这些形态解剖性状沿演替阶段与海拔高度的变化，阐释其与环境与植物分类地位的相互关系，以期为野外取样、室内实验及统计分析奠定基础。

2. 材料和方法

2.1. 研究区概况

金华北山位于浙江省金华市北部，地处中亚热带北缘。海拔 100~1200 m，属亚热带湿润季风气候，年平均降雨量为 1436.8 mm，年平均气温 17.7℃，7 月均温 29.5℃，1 月均温 5.2℃，年日照百分率为 43%，无霜期 256 天。土壤以红壤、黄壤为主，海拔 500 m 以下以红壤为主，海拔 500~1000 m 以黄壤为主。南坡的植被类型为常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、针阔混交林、落叶阔叶林、人工针叶林和山地灌丛等，垂直带谱不明显，但受人为干扰影响大，属典型的亚热带常绿阔叶林退化植被，北坡仅分布有次生灌丛。

2.2. 取样与测定方法

在金华北山南坡选取 4 种植被类型的代表性样地，包括常绿阔叶林(×3)、常绿落叶阔叶混交林(×3)、山脚次生灌丛(×1)和山地原生灌丛(×2) (表 1)。其中，森林样地面积 30 m × 30 m，山脚次生灌丛样地面积 30 m × 10 m，山地原生灌丛样地面积 20 m × 10 m。在每个样地中选取 5~6 种优势木本植物(表 2)，每个优势种选取树龄相近、长势相似的两个植株，从每个植株中上部的枝条上采摘健康、完整、无病的 10 个叶片。

用扫描仪(LI-COR 3100C Area Meter, LI-COR, Lincoln, USA)测量叶面积，利用精确度为 0.01 mm 的游标卡尺测量叶厚(Leaf thickness, LT)，利用精度 0.001 的电子天平称量叶片鲜重，再在 85℃ 下烘干至恒重后称量干重。将上述测定值分别求平均值作为该优势植物的性状值。

2.3. 数据统计分析

Table 1. General situation of the south slope of North Mountain Jinhua

表 1. 金华北山南坡样地概况

植被类型	经纬度	海拔	优势种
常绿阔叶林	29°12'11"N; 119°37'34"E	579 m	山矾、油茶、木荷、格药柃、满山红
	29°11'22"N; 119°38'17"E	568 m	马银花、山矾、格药柃、木荷、窄基红褐柃、短柄柃
	29°13'29"N; 119°38'37"E	644 m	野桐、格药柃、马银花、锥栗、木荷、黄檀
常绿落叶阔叶混交林	29°12'12"N; 119°37'36"E	470 m	櫟木、格药柃、油茶、苦槠、木荷
	29°12'51"N; 119°37'17"E	487 m	格药柃、木荷、山矾、櫟木、短柄柃
	29°13'25"N; 119°38'34"E	658 m	櫟木、格药柃、马银花、茅栗、木荷、紫珠
次生灌丛	29°11'53"N; 119°37'50"E	552 m	格药柃、櫟木、马银花、毛果南烛、石斑木、映山红
山地灌丛	29°12'24"N; 119°38'54"E	939 m	杜鹃、莢蒾、毛柄连蕊茶、山胡椒、山檀
	29°38'55"N; 119°38'55"E	970 m	杜鹃、山胡椒、毛柄连蕊茶、中华绣线菊、中国绣球

利用 Microsoft Excel 和 SPSS 软件进行数据分析。计算各个性状的平均值、标准差、最大值、最小值和变异系数($CV = \text{标准差}/\text{平均值} \times 100\%$)，采用单因素方差分析法分析不同植物性状间存在的差异，同时分析物种、生长型和生活型对性状变异的影响程度。

Table 2. Dominant plant species on the south slope of North Mountain Jinhua
表 2. 金华北山南坡优势植物种

物种	拉丁名	科名	生活型	生长型
木荷	<i>Schima superba</i>	山茶科	乔木	常绿
苦槠	<i>Castanopsis sclerophylla</i>	壳斗科	乔木	常绿
黄檀	<i>Dalbergia hupeana</i>	豆科	乔木	常绿
锥栗	<i>Castanea henryi</i>	壳斗科	乔木	落叶
野桐	<i>Mallotus japonicus</i>	大戟科	灌木	常绿
短柄枹栎	<i>Quercus serrata</i>	壳斗科	乔木	落叶
茅栗	<i>Castanea seguinii</i>	壳斗科	乔木	落叶
马银花	<i>Rhododendron ovatum</i>	杜鹃花科	灌木	常绿
满山红	<i>Rhododendron mariesii</i>	杜鹃花科	灌木	落叶
映山红	<i>Rhododendron pulchrum</i>	杜鹃花科	灌木	常绿
毛柄连蕊茶	<i>Camellia fraterna</i>	山茶科	灌木	常绿
油茶	<i>Camellia oleifera</i>	山茶科	灌木	常绿
窄基红褐柃	<i>Eurya rubiginosa</i>	山茶科	灌木	常绿
山矾	<i>Symplocossumuntia</i>	山矾科	灌木	常绿
石斑木	<i>Rhaphiolepis indica</i>	蔷薇科	灌木	常绿
檵木	<i>Loropetalum chinense</i>	金缕梅科	灌木	常绿
紫珠	<i>Callicarpa bodinieri</i>	马鞭草科	灌木	落叶
杜鹃	<i>Rhododendron simsii</i>	杜鹃花科	灌木	落叶
毛果南烛	<i>Lyonia ovalifolia</i>	杜鹃花科	灌木	落叶
中华绣线菊	<i>Spiraea chinensis</i>	蔷薇科	灌木	落叶
荚蒾	<i>Viburnum dilatatum</i>	忍冬科	灌木	落叶
山胡椒	<i>Lindera glauca</i>	樟科	灌木	落叶
山榲	<i>Lindera reflexa</i>	樟科	灌木	落叶
中国绣球	<i>Hydrangea chinensis</i>	虎耳草科	灌木	落叶

3. 结果与分析

3.1. 植物性状总体变异特征

金华北山 25 种优势木本植物的性状总特征见表 3，其中海绵组织厚度的变化范围最大，最大值与最小值之间相差 6 倍，变异系数在 70% 以上，均值为 102.02 μm ；栅栏组织厚度变化范围最小，变异系数不

到 35%，最大值与最小值之间相差约 3 倍；栅栏组织与海绵组织的厚度比变化范围居中。

在物种水平，不同植物间的同一性状值大小差别较大，且不同性状有不同的权衡(图 1)。如栅栏组织厚度，石斑木的 TP 最大，均值达到 142 μm ，毛柄连蕊茶、格药铃和山矾次之，紫珠和荚蒾的 TP 最小，在 50 μm 以下；油茶的 TS 最大，均值在 220 μm 以上，中华绣线菊的 TS 最小，均值仅有 47 μm ；中华绣线菊的 TP/TS 最大，均值为 1.26，山胡椒次之，油茶的 TP/TS 最小，仅 0.32。从不同物种的性状变异来看，格药铃的 TP 变异最大，最小值与最大值之间相差 35 μm ，青冈和满山红的变异也较大，黄檀、茅栗、紫珠、石斑木的 TP 变异则较小；TS 变异最大的物种是山矾和油茶，大部分物种的 TS 变异较小，如中华绣线菊、茅栗、紫珠和黄檀；TP/TS 变异最大的物种是山胡椒，其次是丁香杜鹃和青冈，变异最小的是茅栗和紫珠；此外可以发现，茅栗和紫珠的三种性状变异均较小。

Table 3. Leaf anatomical characteristics of dominant plants in North Mountain of Jinhua

表 3. 金华北山优势植物的叶片解剖特征

性状 Trait	平均值 \pm 标准偏差 Mean \pm SD	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异系数 Coefficient of variation (%)
栅栏组织厚度 TP (μm)	78.99 \pm 32.44	43.76	141	34.26
海绵组织厚度 TS (μm)	102.02 \pm 42.85	37.33	248	70.91
TP/TS	0.91 \pm 0.05	0.28	1.41	44.23

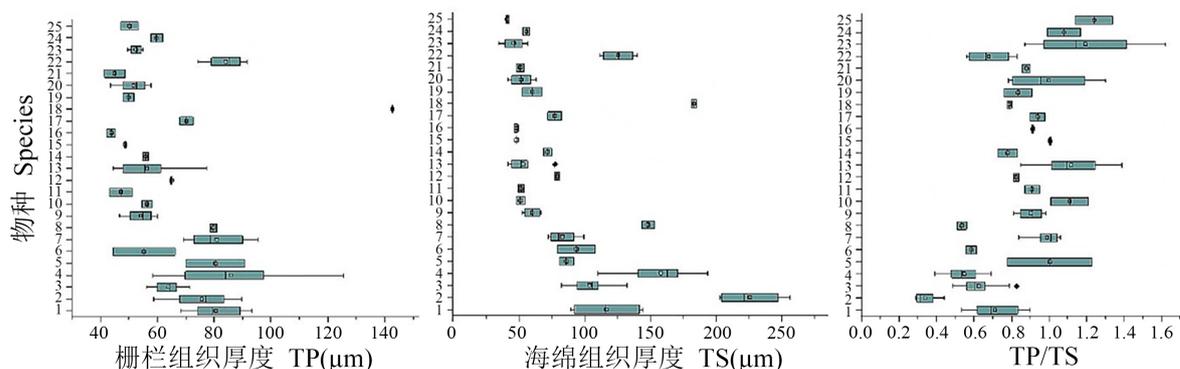


Figure 1. Functional traits of dominant woody plants in North Mountain of Jinhua. The circles on the boxplot indicate outliers; the percentage data in the figure is the coefficient of variation; the ordinates 1~25 represent species. 1. *Symplocos sumuntia*; 2. *Camellia oleifera*; 3. *Schima superba*; 4. *Eurya muricata*; 5. *Quercus glauca*; 6. *Rhododendron farrerae*; 7. *Rhododendron ovatum*; 8. *Eurya rubiginosa*; 9. *Quercus serrata*; 10. *Mallotus tenuifolius*; 11. *Castanea henryi*; 12. *Dalbergia hupeana*; 13. *Loropetalum chinense*; 14. *Castanopsis sclerophylla*; 15. *Castanea seguinii*; 16. *Callicarpa bodinieri*; 17. *Lyonia ovalifolia*; 18. *Rhaphiolepis indica*; 19. *Rhododendron simsii*; 20. *Rhododendron fortunei*; 21. *Viburnum dilatatum*; 22. *Camellia fraterna*; 23. *Lindera glauca*; 24. *Lindera reflexa*; 25. *Spiraea chinensis*

图 1. 金华北山优势木本植物功能性状值。箱线图上的圆圈指示异常值；图中百分数据为变异系数；纵坐标 1~25 代表物种。1. 山矾；2. 油茶；3. 木荷；4. 格药铃；5. 青冈；6. 满山红；7. 马银花；8. 窄基红褐柃；9. 短柄枹柃；10. 野桐；11. 锥栗；12. 黄檀；13. 欏木；14. 苦槠；15. 茅栗；16. 紫珠；17. 毛果南烛；18. 石斑木；19. 映山红；20. 云锦杜鹃；21. 荚蒾；22. 毛柄连蕊茶；23. 山胡椒；24. 山檀；25. 中华绣线菊

3.2. 植物性状的种内与种间变异

金华北山木本植物功能性状的种内、种间变化较大，且不同性状间存在差异(表 4)。除了乔木植物的 TS，无论生长型还是生活型，TS 的种内变异最高，种间差异较大；除落叶植物的 TP/TS 种内差异较大外，TP 及 TP/TS 的种内变异均较小，物种间差异也很小。生长型间各性状的种内变异差异小，TP、TS、TP/TS 均是灌木 > 乔木，不同生活型间，除 TP/TS 外，常绿植物 > 落叶植物。

Table 4. Plant traits (mean \pm standard deviation) and coefficient of variation (interspecific/intraspecific) for different growth and life types**表 4.** 不同生长型和生活型的植物性状(平均值 \pm 标准偏差)及(种间/种内)变异系数

	TP (μm)	TS (μm)	TP/TS
乔木 Tree	67.94 \pm 17.98a (31.22%/26.46%)	107.00 \pm 45.84a (31.21%/42.84%)	0.72 \pm 0.27a (24.56%/31.21%)
灌木 Shrub	66.73 \pm 19.67a (26.51%/29.47%)	99.16 \pm 55.61a (45.67%/56.08%)	0.81 \pm 0.31 a (36.43%/38.69%)
常绿植物 Evergreen	91.60 \pm 33.89b (27.61%/36.99%)	127.93 \pm 68.21c (56.34%/53.31%)	0.82 \pm 0.29bc (33.32%/35.33%)
落叶植物 Deciduous	58.83 \pm 17.01c (23.34%/28.90%)	69.87 \pm 35.19d (62.78%/50.36%)	0.89 \pm 0.42c (32.44%/46.42%)

注：不同字母表示差异显著。TP：栅栏组织厚度；TS：海绵组织厚度；TP/TS：栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值。

3.3. 性状变异的影响因素

单因素方差分析(表 5)表明，物种差异对 TP/TS 性状变异的解释度均最高，但对 TP 性状变异的解释度较低；不同生长型对 TS 和 TP/TS 性状变异的影响程度都较大，只对 TP 性状的影响相对较小；不同生活型对所有性状变异相似。生活型和生长型的交互作用对植物叶片性状变异的影响大于生活型和生长型的单独影响，如对 TS 和 TP/TS 的影响很大，对 TP 的影响次之。

Table 5. Effects of species, growth type and life type on character variation (R^2 value)**表 5.** 物种、生长型和生活型对性状变异的影响(R^2 值)

变量 Variables	TS (μm)	TP/TS	TP (μm)
物种 Species	0.51	0.92	0.33
生长型 Growth form	0.67	0.65	0.32
生活型 Life form	0.55	0.57	0.56
生长型 \times 生活型 Growth form \times Life form	0.91	0.98	0.71

4. 讨论与结论

4.1. 叶片解剖特征的种间和种内变异

本次研究结果表明叶片解剖性状(栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅海比)在物种之间存在显著的差异，这与树种的遗传特性密切相关。同物种内也存在着较为显著的差异，这是由于不同生境对植物的生长发育产生不同影响[21]。灌木树种由于生长在林下而无法获取充足的阳光资源，所以会采取增大栅栏组织厚度的积极性生态策略[12] [13] [14] [15] [16]，我们的结果也进一步表明亚热带常绿、落叶阔叶混交林内的树种和灌木树种的生态学差异。

种间和种内的植物叶片解剖性状差异的研究为深入了解群落构建机制提供了可能。群落构建理论表明，个体间的竞争和生境异质性是影响性状值分布的重要因素[17]。一方面，树种生境的环境过滤作用能筛选出一些具有适应性的叶片解剖性状，具备这些性状或者类似性状的树种可以更好的生存[19]；另一方面，群落内部由于资源竞争而限制了具有相似性状的物种形成生态位的分化。叶片解剖性状受到遗传特性、生境过滤和资源竞争的共同影响。本次研究结果表明，叶片解剖性状在种间和种内都具有明显的变异。

4.2. 叶片解剖结构对功能型的响应

有研究发现, 栅海比和植物光合作用速率是密切相关的, 比如植物光合作用速率随着栅海比的增加有“先增后减”的变化规律[17]。在本研究中, 落叶树种的栅海比平均值为 0.89, 常绿树种栅海比的平均值为 0.82, 落叶树种的 TP/TS 比常绿树种的大, 根据栅海比和光合速率的关系, 可以做出“落叶树种的光合作用速率大于常绿树种”的推测。

此外还能发现常绿植物海绵组织的平均厚度比落叶植物海绵组织的平均厚度大很多, 栅栏组织厚度虽然也有一定差异, 但相差并不是很大。造成该现象的原因可能是二者分布地带的差异。叶片是绿色植物光合作用的主要器官, 植物往往会通过叶片结构的改变适应复杂多变的环境[8]。因而, 较常绿植物而言, 落叶植物无论是叶厚, 还是栅栏组织、海绵组织的厚度都偏小。

在生活型水平上, 乔木的栅海比小于灌木, 但乔木树种的栅栏组织和海绵组织厚度平均值都稍大于灌木, 这可能是二者树木差距导致。灌木没有明显的主干、比较矮小, 而乔木较高, 能吸收的光较灌木而言更多。海绵组织主要用于气体交换和蒸腾作用, 而栅栏组织作为光合作用的主要组织, 其厚度越大, 光合能力也越强[8]叶片作为植物功能器官, 与周围环境直接发生关系, 叶片结构功能与环境的统一, 反映在其能适应环境并随着环境基本组织结构等发生适应性变化, 体现了植物适应环境变化所形成的生存对策。因而乔木和灌木栅栏组织和海绵组织存在较大差异。

4.3. 结论

本研究结果表明, 金华北山木本植物功能性状既相互联系又存在较大的种内与种间差异, TS 的种内变异最高, 且种间差异较大; 分析性状变异的影响因素, 证明生活型和生长型的交互作用对植物叶片性状变异的影响大于生活型和生长型的单独影响。金华北山植物在叶片发育过程中形成了一系列减小蒸腾和储存养分的功能性状组合, 从而提高其对环境的选择优势。

参考文献

- [1] 庞世龙, 欧芷阳, 申文辉, 何峰, 陆国导. 桂西南喀斯特地区优势木本经济植物叶功能性状变异及其适应策略[J]. 广西植物, 2021, 41(5): 707-714.
- [2] Scoffoni, C., Rawls, M., McKown, A., Cochard, H. and Sack, L. (2011) Decline of Leaf Hydraulic Conductance with Dehydration: Relationship to Leaf Size and Venation Architecture. *Plant Physiology*, **156**, 832-843. <https://doi.org/10.1104/pp.111.173856>
- [3] Ogburn, R.M. and Edwards, E.J. (2012) Quantifying Succulence: A Rapid, Physiologically Meaningful Metric of Plant Water Storage. *Plant, Cell & Environment*, **35**, 1533-1542. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02503.x>
- [4] Nardini, A. and Luglio, J. (2014) Leaf Hydraulic Capacity and Drought Vulnerability: Possible Trade-Offs and Correlations with Climate across Three Major Biomes. *Functional Ecology*, **28**, 810-818. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12246>
- [5] 王瑞丽, 高慧蓉, 张明, 刘欣蕊, 王雪, 陈昊轩, 张硕新. 黄土高原不同植被带内草地植物叶解剖性状的变异规律[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 1135-1146.
- [6] 薛立, 曹鹤. 逆境下植物叶性状变化的研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 2004-2009.
- [7] 邱志军, 刘鹏, 刘春生, 高建国. 金华北山常绿阔叶林群落结构及优势乔木树种更新类型[J]. 广西植物, 2010, 30(5): 629-635.
- [8] Weiher, E., Freund, D., Bunton, T., Stefanski, A., Lee, T. and Bentivenga, S. (2011) Advances, Challenges and a Developing Synthesis of Ecological Community Assembly Theory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **366**, 2403-2413. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0056>
- [9] Kraft, N.J.B., Valencia, R. and Ackerly, D.D. (2008) Functional Traits and Niche-Based Tree Community Assembly in an Amazonian Forest. *Science*, **322**, 580-582. <https://doi.org/10.1126/science.1160662>
- [10] 唐青青, 黄永涛, 丁易, 臧润国. 亚热带常绿阔叶混交林植物功能性状的种间和种内变异[J]. 生物多样性,

- 2016, 24(3): 262-270.
- [11] 萨其拉, 张霞, 朱琳, 康萨如拉, 爽爽, 鲁向荣, 谢金凤. 长期不同放牧强度下荒漠草原建群种短花针茅(*Stipa breviflora*)叶片解剖结构变化[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 6005-6014.
- [12] 任尚福. 不同居群驼蹄瓣叶片解剖结构比较研究[J]. 中国野生植物资源, 2018, 37(1): 18-21, 36.
- [13] 许耀照, 曾秀存, 张芬琴, 孙佳, 孙万仓, 武军艳. 白菜型冬油菜叶片结构和光合特性对冬前低温的响应[J]. 作物学报, 2017, 43(3): 432-441.
- [14] 郭玉华, 蔡志全, 曹坤芳, 王渭玲. 四种热带雨林树种光合和形态解剖特征对不同生长光强的适应[J]. 植物科学学报, 2004, 22(3): 240-244.
- [15] 杨一. 临安次生灌丛植被小尺度的空间异质性研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [16] Weston, M., Falster, D.S., Moles, A.T., Vesk, P.A. and Wright, I.J. (2002) Plant Ecological Strategies: Some Leading Dimensions of Variation between Species. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **33**, 125-159. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150452>
- [17] 刘梦颖, 刘光立. 高山植物全缘叶绿绒蒿叶片形态及解剖结构对海拔的响应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(1): 35-42.
- [18] 闫成才, 刘晓娟, 田青, 孙学刚, 郝海婷, 杨巨才. 藏芥营养器官解剖结构及其与环境的关系[J]. 西北植物学报, 2013, 33(5): 946-951.
- [19] 任尚福. 白刺叶片解剖结构性状异速生长与生态适应性研究[J]. 草地学报, 2022, 30(5): 1150-1158.
- [20] 吴建波, 王小丹. 高寒草原优势种紫花针茅叶片解剖结构对青藏高原高寒干旱环境适应性分析[J]. 植物生态学报, 2021, 45(3): 265-273.
- [21] 李周, 赵雅洁, 宋海燕, 张静, 陶建平, 刘锦春. 不同水分处理下喀斯特土层厚度异质性对两种草本叶片解剖结构和光合特性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 721-732.