

常见园林乔木叶功能性状对不同气候类型响应的区域差异 ——以苏南、苏北为例

The Study of Regional Differences in the Response of Common Garden Tree Leaf Functional Traits to Various Climate Types: A Case Study of Southern Jiangsu and Northern Jiangsu

王晟尧¹ 张兴^{1*} 高飞^{1,2}
WANG Shengyao¹ ZHANG Xing^{1*} GAO Fei^{1,2}

(1.苏州科技大学建筑与城市规划学院, 苏州 215129; 2.黑龙江省科学院自然与生态研究所, 哈尔滨 150040)

(1. School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu, China, 215129;
2. Institute of Natural and Ecological Sciences, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang, China, 150040)

文章编号: 1000-0283(2026)02-0118-09

DOI: 10.12193/j.laing.20250306001

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-03-06

修回日期: 2025-08-25

摘要

近年来, 随着城市的气候环境变化, 越来越多的研究开始聚焦于植物叶功能性状对气候环境的响应策略。以苏南、苏北典型城市苏州、宿迁为对比区域, 系统分析8种园林乔木的11项叶功能性状适应性特征。通过变异系数分析、t检验及主成分分析发现: (1) 不同气候条件下的叶功能性状展现出地域性特征。叶面积 (LA)、叶干物质含量 (LDMC)、比叶面积 (SLA)、净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs) 和气孔面积 (SS) 在宿迁的乔木中的变异系数更高; 而叶绿素相对含量 (SPAD)、蒸腾速率 (Tr)、单位质量叶碳含量 (C_{mass})、叶氮含量 (N_{mass}) 以及气孔密度 (SD) 在苏州的乔木中变异系数更大。平均水平上, 宿迁乔木具有更高的SPAD、Pn、Tr、 C_{mass} 、 N_{mass} 和SS, 苏州乔木则表现出更高的LDMC与SD。(2) 性状间存在显著协同—权衡关系, 植物调整气孔结构、光合能力和水分利用策略是植物的核心适应机制。(3) 主成分分析揭示差异化适应策略。宿迁乔木采取“资源获取型”策略, 通过提升光合效能和碳氮积累应对寒旱—湿热交替气候; 苏州乔木则形成“保守抗逆型”策略, 以高叶干物质含量和密集气孔增强湿热环境抗性。揭示了植物在不同气候条件下的适应策略, 为城市绿化、树种选择及应对气候变化的生态修复提供科学依据, 具有重要的生态学和园林设计意义。

关键词

园林乔木; 叶功能性状; 气候; 适应策略; 协同关系; 宿迁; 苏州

Abstract:

In recent years, as the urban climate and environment have changed, research has increasingly focused on how plant leaf functional traits respond to climate conditions. This study compared two typical cities in Jiangsu Province—Suzhou, with a subtropical monsoon climate, and Suqian, with a temperate monsoon climate. We analyzed 11 leaf functional traits of eight landscape tree species. Using coefficient of variation analysis, t-tests, and principal component analysis, we found:(1) Leaf functional traits varied with the climate. In Suqian, traits like LA, LDMC, SLA, Pn, Gs, and SS showed higher variation coefficients. In Suzhou, traits such as SPAD, Tr, C_{mass} , N_{mass} , and SD had greater variation coefficients. On average, Suqian trees had higher SPAD, Pn, Tr, C_{mass} , N_{mass} and SS, while Suzhou trees had higher LDMC and SD. (2) There were significant synergistic and trade-off relationships between leaf functional traits. Plants adjusted their stomatal structure, photosynthetic capacity, and water-use strategies to adapt to different climates. (3) Principal component analysis revealed different adaptation strategies. Suqian trees adopted a “resource - acquisition - priority” strategy, enhancing photosynthesis and carbon/nitrogen accumulation to cope with alternating cold/dry and hot/humid conditions. Suzhou trees developed a “conservative - stress - resistance - priority” strategy, with high LDMC and SD to withstand the hot, humid climate. This study shows that plants adapt to climates through trait combinations, providing key theoretical support for selecting urban tree species and for climate-adaptive greening, especially in ecological restoration amid extreme climates.

Keywords

garden trees; leaf functional trait; climate; adaptation strategy; synergistic relationship; Suqian; Suzhou

王晟尧

1999生/男/安徽安庆人/在读硕士研究生/
研究方向为地域景观生态规划与生态修复

张 兴

1968生/男/黑龙江哈尔滨人/教授、博士生导师/研究方向为地域景观生态规划与生态修复

高 飞

1986年生/女/黑龙江大庆人/副教授、硕士生导师/研究方向为园林与景观设计

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: 1006598747@qq.com

基金项目:

宿迁交通科研基金项目“宿迁市城市道路行道树叶水平固碳抗污(空气)能力评价方法研究”(编号: 2022Y11)

随着全球气候的不断变化，城市气候环境也面临着日益显著的波动。植物作为城市生态系统的关键组成部分^[1]，对气候环境具有高度敏感性，其叶片性状往往能在一定程度上反映对外界资源（光照、水分、养分等）的获取与利用效率^[2]。目前，国内外学者对植物叶功能性状与单一环境因子的关系研究较多，如海拔梯度^[3]、冠层梯度^[4]、日照程度^[5]、大气污染^[6]及水分梯度^[7]等。然而，多数已有研究关注的是较大尺度（如跨省区或国家级别）或者非常小尺度（例如同一公园、同一群落内的微环境差异），对“同省内部不同气候带”这一中尺度分异下植物叶功能性状与适应策略的细化研究不足，尤其缺乏对城市园林乔木在不同气候带应对机制的深入研究。

江苏省地处中国东部沿海，“秦岭—淮河”线将其划分为南北两大片区：苏北地区以温带季风气候为主，冬季寒冷干旱、夏季多雨^[8]，年降水量低于1 000 mm，1月平均气温低于0℃；苏南地区以亚热带季风气候为主，夏季高温湿热、降水集中^[9]，年降水量高于1 000 mm，1月平均气温高于0℃。这样的气候差异可能导致植物在叶功能性状及其协同关系上呈现不同的应对模式。苏北的宿迁和苏南的苏州分别是温带季风气候与亚热带季风气候的典型城市，且除了气候条件差异外，宿迁与苏州都拥有丰富的湖泊与水网资源，有着相似的城市生态格局。在此背景下，本研究以宿迁和苏州为研究地点，选择两地均常见且生长稳定的8种园林乔木作为研究对象，测定11项叶功能性状，分析其在不同区域气候下的变异特征和协同关系。主要探讨以下问题：（1）苏南与苏北气候类型下，乔木叶功能性状的变异幅度与均值差异如何？（2）不同叶片性状之间是否存在显著

的协同或权衡关系？（3）这些差异性与协同性对树种适应当地气候具有何种指示意义？

本研究的创新之处在于同省区内对比两种典型气候类型，且测定指标涵盖结构、生理以及化学性状，这有助于揭示叶功能性状的协同适应机制，也能为江苏南北城市园林树种选择、极端气候下的植物管理和生态修复提供可行参考。

1 材料与方法

1.1 研究材料

1.1.1 研究区域概况

本研究旨在探寻常见园林植物叶片功能性状对不同气候环境的适应策略。以江苏省宿迁市和苏州市为样本采集地。宿迁市（117° 56'—119° 10' E, 33° 8—34° 25' N）位于苏北地区，年平均日照2 200 h，年平均气温14.3℃，年降水量910 mm，平均风速12.2 km/h；苏州（119° 55'—121° 20' E, 30° 47'—32° 02' N）位于苏南地区，年平均日照1 950 h，年平均气温15.7℃，年降水量1 094 mm，平均风速11.3 km/h。城市公园植物种类丰富、管理良好、采样方便且人为干扰相对可控，能够较好地反映城市生态环境和植物对气候的响应，因此本研究选取宿迁

市与苏州市建设情况良好的城市公园作为研究样地。具体而言，在宿迁市，选择古黄河水景公园、九鼎公园、虞姬公园作为研究对象；在苏州市，选择苏州公园、桐泾公园、何山公园作为研究对象。所选样地在条件上较为接近，且其养护水平基本相当，这为后续研究的科学性和可比性提供了有力保障。

1.1.2 研究树种选择

在样本采集前，对苏州和宿迁进行大范围的城市树种调查。基于调查结果，选取两地均有且生活习性稳定、具有代表性和典型性的8个树种作为研究对象（表1），包含4种常绿阔叶乔木和4种落叶阔叶乔木。共选取样本树种144株，确保每个样本树种不少于15株。所选样本均为生长旺盛、无病虫害且树龄相近的成年个体，以保证样本的代表性和研究结果的可靠性。

1.2 研究指标的选取

基于国内外对植物各叶功能性状的大量研究及总结工作，本研究选择对叶面积（Leaf Area, LA）、比叶面积（Specific Leaf Area, SLA）、叶干物质含量（Leaf Dry Matter Content, LDMC）、叶绿素相对含量（Soil-Plant Analysis Development,

表1 研究植物概况
Tab. 1 Overview of the studied plant species

序号 No.	种名 Species	科名 Family	属名 Genus	植物生活型 Plant life form
1	枇杷 (<i>Eriobotrya japonica</i>)	蔷薇科	枇杷属	常绿乔木
2	广玉兰 (<i>Magnolia grandiflora</i>)	木兰科	木兰属	常绿乔木
3	香樟 (<i>Cinnamomum camphora</i>)	樟科	樟属	常绿乔木
4	桂花 (<i>Osmanthus fragrans</i>)	木樨科	木樨属	常绿乔木
5	朴树 (<i>Celtis sinensis</i>)	大麻科	朴属	落叶乔木
6	悬铃木 (<i>Platanus orientalis</i>)	悬铃木科	悬铃木属	落叶乔木
7	栾树 (<i>Koelreuteria paniculata</i>)	无患子科	栾属	落叶乔木
8	樱花 (<i>Cerasus serrulata</i>)	蔷薇科	李属	落叶乔木

注：植物科属名及排序参考《中国植物志》；生活型分类参考《中国植被》和劳恩凯尔分类法。

SPAD)、净光合速率(Net Photosynthetic Rate, Pn)、气孔导度(Stomatal Conductance, Gs)、蒸腾速率(Transpiration Rate, Tr)、叶碳含量(Leaf Carbon Content, C_{mass})、叶氮含量(Leaf Nitrogen Content, N_{mass})、气孔密度(Stomatal Density, SD)、气孔面积(Stomatal Size, SS)这11种叶功能性状展开研究,这些指标的选取综合考虑了它们在反映叶片生理功能、结构特征和环境适应性等方面的重要性和代表性,以及测量方法的可行性、准确性和可重复性,以期构建一个全面、系统且实用的叶功能性状指标体系(表2)。

1.3 样品采集与测定

样品的采集工作于2023年8—10月进行,该时间段涵盖了多数植物叶片物质积累最为丰富的夏秋季节。在采集样本时,严格遵循以下标准:选择当年生、向阳且光照度一致的无病虫害、完全延展的成熟叶片,以确保样本的代表性和一致性。对于每个样本树种,采集的叶片数量均在200片以上。

叶鲜质量的称量方式为:去除叶柄,吸干叶片水分后将其放在电子天平(精确到0.0001 g)上称量。随后,将叶片置80 °C烘箱

中烘干8 h直至恒重,用电子天平称量叶片干质量,按公式(1)计算叶干物质含量。

$$L = L_D / L_F \quad (1)$$

式中, L为LDMC值; L_D为LDW值,即叶片干质量,单位为g; L_F为LFW值,即叶片鲜质量,单位为g。用叶面积扫描仪(MICROTEK ScanMaker i800plus)测定待测叶片的面积。按公式(2)计算比叶面积。

$$S = L_A / L_F \quad (2)$$

式中, S为SLA值; L_A为LA值。

在晴朗无风的天气,于9:00—12:00进行叶片采集,使用光合仪(PPsystem, LiCor 6400XT, USA)光源选择LED红蓝光源,光强度设定为1 500 μmol·m⁻²·s⁻¹, CO₂浓度设定为400 μmol·L⁻¹, 叶室温度设定为30°C。测定Pn、Gs和Tr。随后在相同环境条件下,使用便携式叶绿素仪(TYS-B)测定植物叶片SPAD值。将叶片样本烘干至恒重后,研磨过筛成叶片样本粉末,使用元素分析仪(EUROEA 3000)测定植物叶片中的碳氮含量。

采用“透明指甲油印迹—胶带综合法”

制片^[11],利用光学显微镜(Nikon YS100)放大100倍及400倍拍摄气孔图像,每个玻片随机选取15~20个视野,利用Toupview软件计算气孔参数指标,包括气孔面积(SS)与气孔密度(SD)。

1.4 数据处理与分析

用Excel 2016进行数据统计和处理,求算各样本性状平均值。运用SPSS 26.0软件对各叶功能性状指标作独立样本t检验,研究8种常见绿化乔木叶功能性状对宿迁、苏州两地不同气候的响应以及不同生长型乔木叶功能性状在宿迁、苏州的差异;利用Pearson相关性分析不同叶性状之间的关系;再运用主成分分析来筛选出主要的叶性状指标。

2 分析与结果

2.1 两个城市叶功能性状种间和种内变异特征

宿迁与苏州8种乔木的变异系数见表2。根据变异系数大小将其分为三类,便于数据分类比较、突出差异特征,有助于直观理解园林乔木叶功能性状的稳定性和可塑性。其中变异系数≤0.2为低变异,0.2~0.5为中等变异,≥0.5为强变异^[12-14]。宿迁8种乔木叶功能性状种间变异系数范围为4.88%~104.59%。其中, LA、SLA、Gs和SS为高变异; LDMC、Pn、Tr和SD为中变异; SPAD、C_{mass}和N_{mass}为低变异。Gs稳定性最差,C_{mass}稳定性最强。苏州8种乔木叶功能性状种间变异系数范围为13.10%~102.13%。其中, LA、SLA、Gs、Tr、SS和SD为高变异; LDMC和Pn为中变异; SPAD、C_{mass}和N_{mass}为低变异。Gs稳定性最差,C_{mass}稳定性最强。宿迁乔木的LA、LDMC、SLA、Pn、Gs和SS的变异系数大于苏州乔木;而宿迁乔木的SPAD、Tr、C_{mass}、N_{mass}和SD的变异系数小于苏州乔木。

表2 叶功能性状指标体系^[10]
Tab. 2 Leaf functional traits indicator system

性状 Trait	英文缩写 English abbreviation	性状指标描述 Trait description
叶面积 LA		反映植物光捕获能力,体现光合潜力,用于研究资源获取策略
比叶面积 SLA		表征资源利用策略和环境适应性,关联生长速率与资源投入
叶干物质含量 LDMC		反映叶片机械强度与抗逆性,衡量抗逆及资源保存策略
叶绿素相对含量 SPAD		与光合能力及氮营养相关,评估光合作用潜力与氮利用效率
净光合速率 Pn		反映光合与碳同化能力,体现植物对气候资源的适应性
气孔导度 Gs		关键气体交换指标,决定水分利用与光合效率,应对环境胁迫
蒸腾速率 Tr		叶片水分散失的通量指标,体现植物水分平衡及热量调节效率
叶碳含量 C _{mass}		植物资源分配化学指标,与结构组织及储能积累相关
叶氮含量 N _{mass}		植物资源分配化学指标,关联光合酶活性与蛋白质合成
气孔密度 SD		影响气体交换与水分利用效率,评估蒸腾调节及耐逆能力
气孔面积 SS		影响气体交换与水分利用效率,评估蒸腾调节及耐逆能力

2.2 两个研究区叶功能性状差异

根据图1的分析结果, 苏州与宿迁常见园林乔木的11个叶功能性状中, LA、SLA和Gs三个指标差异不显著, 而其余8个指标存在显著差异。具体而言, 苏州常见园林乔木的LDMC和SD显著高于宿迁; 相反, 宿迁常见园林乔木在SPAD、Pn、Tr、C_{mass}、N_{mass}以及SS等方面均显著高于苏州(表3)。图2为宿迁与苏州两地8种园林乔木叶片的气孔显微结构图像。图像中清晰展示了各树种叶片表皮的气孔分布特征, 包括SD与SS。通过对比可发现, 不同树种在两地的气孔大小和密度存在明显差异, 如苏州地区乔木叶片的SD整体高于宿迁地区, 而宿迁地区乔木的SS通常较大。

2.3 不同叶功能性状之间的关系

Pearson分析结果显示(表4), 宿迁、苏州两地常见8种乔木叶功能性状间表现出显著相关性。LA与SLA、SS呈显著正相关, 与SPAD、SD呈显著负相关; LDMC与SD呈显著正相关, 与SLA、Pn、N_{mass}呈显著负相关; SLA与Pn、N_{mass}呈显著正相关, 与SPAD呈显著负相关; SPAD与Tr、C_{mass}呈显著正相关; C_{mass}与SS呈显著正相关, 与Gs、SD呈显著负相关; SD与Pn、SS呈显著负相关。

研究发现, 在宿迁与苏州, LDMC与SLA则呈极显著负相关($p < 0.01$, 图3-a), LA与SS($p < 0.01$, 图3-b)、Gs与Tr皆呈极显著正相关($p < 0.01$, 图3-c), 而Tr与N_{mass}在宿迁呈极显著正相关、在苏州呈极显著负相关($p < 0.01$, 图3-d)。

2.4 宿迁、苏州8种常见乔木叶功能性状主成分分析

为综合评价叶功能性状对不同气候环境的响应情况, 本研究对11个叶功能性状(LA、

LDMC、SLA、SPAD、Pn、Gs、Tr、C_{mass}、N_{mass}、SS、SD)进行了主成分分析(表4)。KMO值为0.5007, Bartlett球形度检验 $p < 0.01$, 说明数据适合进行主成分分析。根据特征值大于1的原则, 最终提取出4个主成分, 结合碎石图和累计方差贡献率(表5), 第1至4个主成分的特征值分别为3.163、1.882、1.683和1.550, 累计解释率达75.25%, 说明这4个主成分已

能充分代表乔木叶功能性状在苏南、苏北地区的综合适应策略。

在SPSS得出的成分矩阵中(表6), 以特征向量值大于0.5作为筛选标准, 确定各主成分的主要性状指标。具体结果为: 第1主成分包括LA、LDMC、SLA、N_{mass}、SS和SD, 第2主成分包括Gs和Tr, 第3主成分包括LA、Pn、Gs和SS, 第4主成分包括SPAD和C_{mass}。

表3 两地区园林乔木叶功能性状平均值±标准差和变异系数
Tab. 3 Mean ± SD and coefficient of variation of leaf functional traits of arbor species in the two regions

性状 Trait	宿迁 Suzhou		苏州 Suzhou	
	Mean ± SD	CV	Mean ± SD	CV
LA/mm ²	3 728.53 ± 3 815.82	102.34%	4 766.89 ± 4 844.97	101.64%
LDMC/g·g ⁻¹	0.38 ± 0.1	27.24%	0.44 ± 0.09	19.58%
SLA/cm ² ·g ⁻¹	95.95 ± 73.53	76.64%	87.9 ± 60.42	68.74%
SPAD	51.41 ± 6.75	13.13%	46.85 ± 8.44	18.02%
Pn/μ mol·g ⁻¹ ·s ⁻¹	14.38 ± 6.11	42.51%	9.69 ± 2.88	29.72%
Gs/mmol·m ⁻² ·s ⁻¹	0.32 ± 0.34	104.59%	0.32 ± 0.32	102.13%
Tr/mmol H ₂ O·m ⁻² ·s ⁻¹	4.27 ± 0.93	21.82%	2.9 ± 2.42	83.71%
C _{mass} /mg·g ⁻¹	488.88 ± 23.84	4.88%	460.57 ± 60.35	13.10%
N _{mass} /mg·g ⁻¹	18.11 ± 3.34	18.43%	14.53 ± 2.9	19.93%
SS/μ m ²	264.63 ± 159.17	60.15%	189.1 ± 108.84	57.56%
SD/个·mm ⁻²	358.07 ± 149.44	41.73%	563.8 ± 304.17	53.95%

表4 叶功能性状相关性分析
Tab. 4 Correlation analysis of leaf functional traits

性状 Trait	LA	LDMC	SLA	SPAD	Pn	Gs	Tr	C _{mass}	N _{mass}	SS	SD
LA	1.000										
LDMC	-0.248	1.000									
SLA	0.314*	-0.764**	1.000								
SPAD	-0.289*	0.239	-0.291*	1.000							
Pn	-0.067	-0.428**	0.360*	-0.044	1.000						
Gs	-0.123	0.046	-0.123	0.145	-0.255	1.000					
Tr	-0.071	-0.052	-0.124	0.407**	0.108	.682**	1.000				
C _{mass}	0.098	-0.036	0.033	0.292*	0.066	-0.357*	-0.275	1.000			
N _{mass}	-0.079	-0.479**	0.511**	0.153	0.211	-0.045	0.007	0.253	1.000		
SS	0.595**	-0.255	0.195	-0.180	-0.229	0.066	0.002	0.358*	0.210	1.000	
SD	-0.0343*	0.378**	-0.270	0.232	-0.369**	0.142	0.007	-0.429**	-0.250	-0.448**	1.000

注: *在0.05级别(双尾), 相关性显著, **在0.01级别(双尾), 相关性显著。

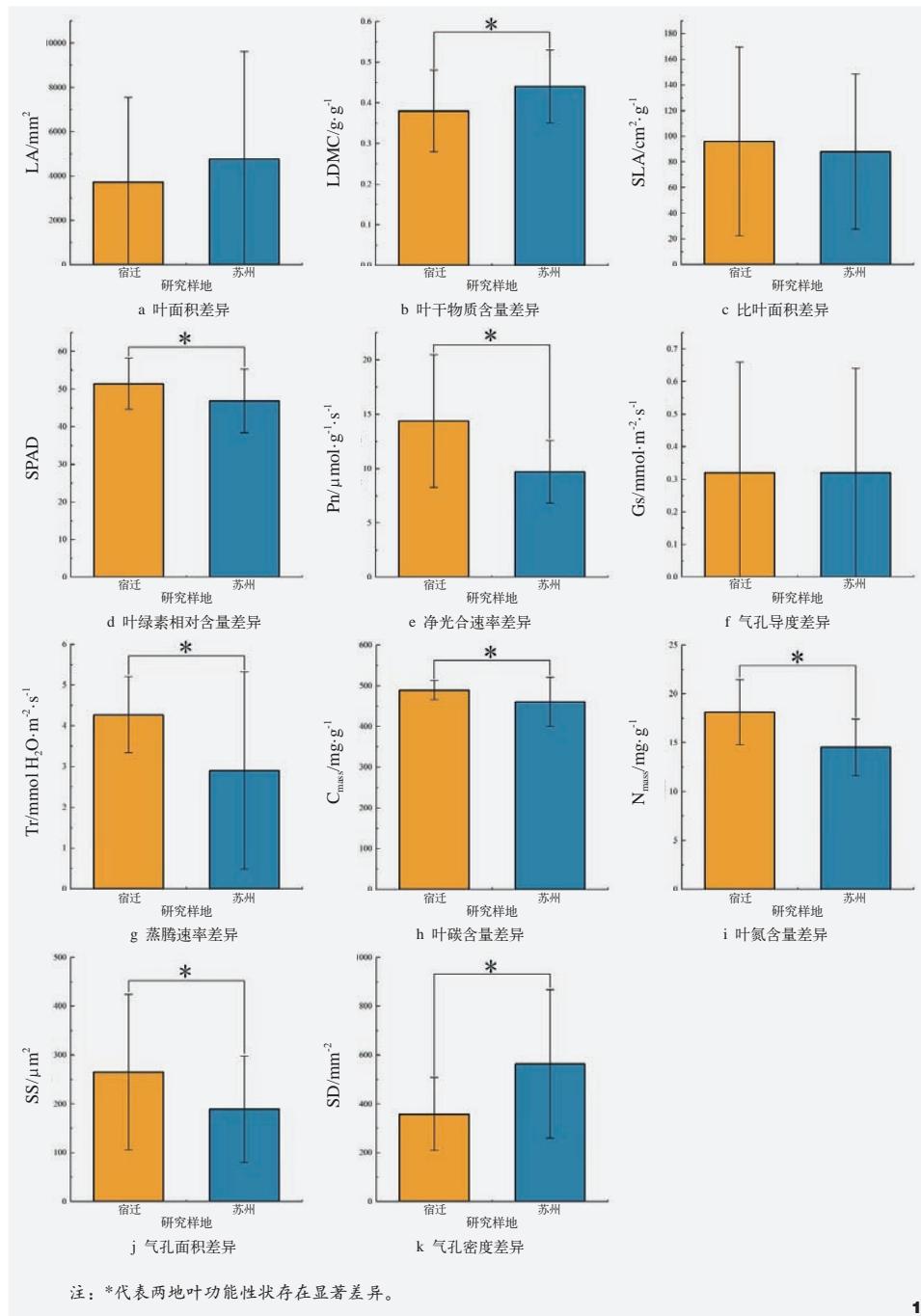


图1 两个研究区域的叶功能性状差异

Fig. 1 Differences in leaf functional traits between the two study regions

主成分1主要体现叶片形态 (LA、SLA)、养分水平 (N_{mass}) 与气孔结构 (SS、SD) 的协同变化；主成分2则主要与 G_s 和 T_r 相关，可视为

“水分调控—蒸腾能力”维度；主成分3进一步凸显 LA、 P_n 和气孔特征 (G_s 、SS) 的关联，反映“光合效率与气孔结构协同”的组合；

主成分4则揭示 SPAD 与 C_{mass} 的耦合，可视为“叶片生理—生化”维度。

3 讨论与结论

3.1 不同气候类型下乔木叶功能性状的差异

研究结果显示，两地乔木在 LA、SLA 和 G_s 方面差异不显著，但其余叶功能性状上存在显著差异。值得注意的是，LA、SLA、 G_s 的变异系数位居所有测定性状前列，表明这些性状对环境变化具有更强的适应可塑性，尤其是 LA 作为植物获取光能的关键因素，其较高的表型变异可能缓冲了宿迁与苏州两地充足光照条件下的环境压力，导致均值未呈现显著差异。SLA 与植物截取光能的能力及抗旱能力密切相关^[15-16]，虽然宿迁年降水量约 910 mm 未形成极端干旱，但年际降水波动可能通过其较高的 SLA 变异系数（仅次于 LA、SS）反映植物对水分利用效率的动态调节。这种资源获取策略的种间差异与宿迁环境异质性较高有关，其 P_n 变异系数显著大于苏州，印证了当地光照强度、温度变化及水分供应不稳定性对光合作用过程的影响^[17]。

苏州受副热带高压影响^[18]，夏季极端高温频发，伏旱现象时有发生，这驱动了植物叶片 LDMC 的显著升高以增强抗逆能力。值得注意的是，宿迁 LDMC 的变异系数（27.24%）明显高于苏州（19.58%），可能源于其温带季风气候下全年降水分布不均，导致植物在不同生长期面临差异化的水分供应压力。从全年来看，苏州年降水量较宿迁高出约 1/3 但阴雨频繁，其年平均日照不足直接反映在 SPAD 值的显著降低，这与叶绿素合成依赖光照的特性相符^[19]。而宿迁较高的 SPAD 值和 N_{mass} 可能协同作用于抗旱适应，其 T_r 变异系数相对稳定（21.82%）的特征，印证了该地区乔木通过精细的蒸腾调节机制维持水分平衡^[20]。碳

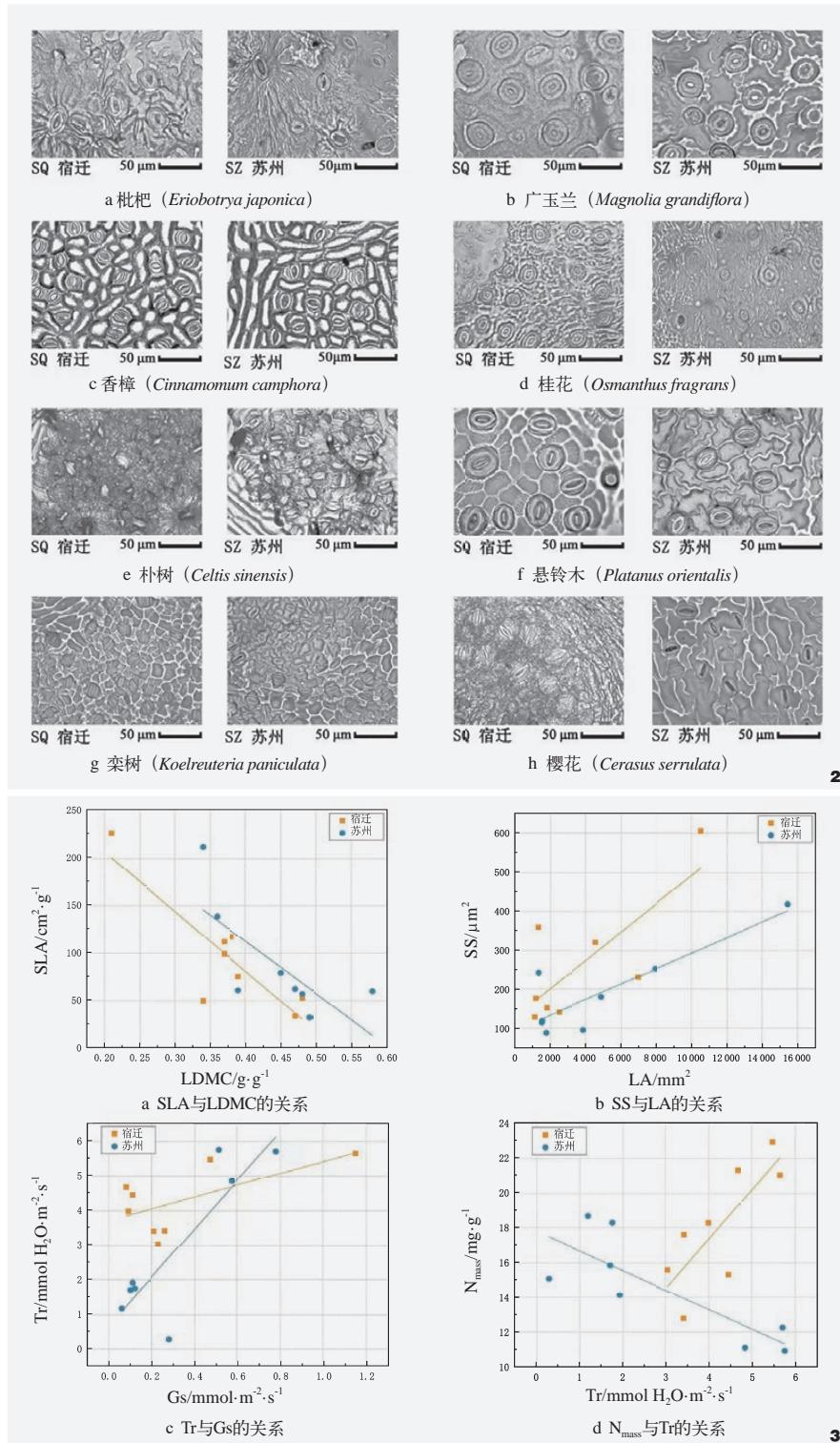


图2 宿迁与苏州8种植物气孔图像

Fig. 2 Stomatal images of eight plant species in Suqian and Suzhou

图3 不同研究区叶功能性状关系

Fig. 3 Relationships among leaf functional traits across study areas

代谢方面，宿迁植物更高的 C_{mass} 和 Pn 不仅与年平均风速较大引发的机械抗性演化相关^[21]，其 C_{mass} 变异系数(4.88%)与 N_{mass} (18.43%)的显著差异也提示碳氮分配策略存在物种特异性分化。此外，苏北温带季风气候与苏南亚热带季风气候的差异不仅体现在年均温和年降水量，更关键的是气候胁迫特征的差异：宿迁冬季极端低温与春季干旱构成双重胁迫，而苏州夏季持续高温伴随高湿形成湿热胁迫。这种气候分异驱动了植物采取不同的资源分配策略：苏北乔木通过提高 C_{mass} 构建更坚固的细胞壁抵御冻害，同时增大SS以在短暂生长季快速完成气体交换；而苏南乔木则通过高SD实现精准的水分调控，应对频繁的暴雨—高温交替胁迫^[22]，而SD和SS的高变异系数(分别达57.56%和53.95%)则凸显气孔特征在环境适应中的关键调节作用^[23]。

3.2 不同叶片性状之间的协同和权衡关系

在演化以及适应环境的过程中，植物逐渐发展出了多种性状组合，以此来适应不同的环境条件。无论是在苏北地区的宿迁，还是在苏南地区的苏州，常见乔木的叶功能性状之间均存在着一定的相关性。具体而言，高LDMC含量意味着植物具备更强的抵抗环境胁迫的能力，而较小的SLA则代表着植物具有更强的适应干旱和贫瘠环境的能力，故二者呈负相关关系；Tr与Gs紧密相关，气孔导度越大，气孔张开程度也就越大，因此二者呈正相关关系； N_{mass} 与叶片的光合能力以及水分利用效率密切相关，而SLA恰能反映出叶片对光的截取能力以及植物的抗旱能力，所以二者之间呈显著的正相关。LA与SS呈正相关，有可能是光合作用与气体交换的协同需求，LA增大意味着光合作用的光捕获面积增加，气孔是 CO_2 进入的主要通道，SS增加可提升单位时间内 CO_2 扩散速率，支持高光合速率^[24]；另一种可能是大LA叶片在高温下易积累热量，通过增大SS提升蒸腾散热效率，避免光合系统过热导致损伤^[25]。在宿迁与苏州出现Tr与 N_{mass} 的相反相关性可能是因为，温带季风

表5 总方差解释表
Tab. 5 Summary of variance explanation

成分 Factor	初始特征值 Eigenvalue	方差百分比 /% Explained variance	累积 /% Cumulative proportion
1	3.163	28.753	28.753
2	1.882	17.11	45.863
3	1.683	15.299	61.162
4	1.550	14.087	75.248
5	0.985	8.951	84.2
6	0.637	5.787	89.987
7	0.349	3.176	93.163
8	0.267	2.427	95.591
9	0.229	2.081	97.672
10	0.141	1.284	98.955
11	0.115	1.045	100

表6 两地园林乔木叶功能性状成分矩阵
Tab. 6 Pattern matrix of leaf functional traits of arbor species in the two regions

性状 Trait	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	主成分 4 Principal component 4
LA	0.52	-0.223	0.596	-0.154
LDMC	-0.767	-0.411	0.105	0.21
SLA	0.769	0.273	-0.157	-0.282
SPAD	-0.366	0.324	-0.133	0.742
Pn	0.426	0.311	-0.574	-0.056
Gs	-0.348	0.673	0.505	-0.063
Tr	-0.25	0.817	0.312	0.134
C _{mass}	0.391	-0.33	-0.05	0.784
N _{mass}	0.533	0.382	-0.243	0.324
SS	0.538	-0.109	0.712	0.231
SD	-0.699	0.003	-0.152	-0.232

气候的宿迁夏季高温多雨、冬季寒冷干燥，生长季短，植物倾向于“高投资—高回报”策略，高N_{mass}促进叶绿素合成，导致光合速率提升、Tr同步升高；亚热带湿润气候的苏州水热资源充足但光照竞争激烈，植物倾向于“保守优化”策略，高N_{mass}可能优先用于生物碱合成以抵御高湿度下的病原菌侵袭或细胞壁增厚以延长叶片寿命^[26]。

基于主成分分析对宿迁与苏州植物叶片功能性状的研究表明，叶片性状间的协同与

权衡关系可通过4个主成分表征，且各成分对应不同的生态适应策略。第1主成分解释了叶片经济型策略的核心维度，其中LA、SLA、N_{mass}及SS呈显著正相关（特征向量>0.5），共同指示植物通过增大LA、提升光合氮利用效率及扩大气孔面积以优化资源获取^[27-28]；然而，上述性状与LDMC及SD呈显著负相关（特征向量<-0.5），表明快速生长策略需以降低叶片机械抗性（低LDMC）及减少单位面积气孔数量为代价^[29]，印证了植物在“资源获

取—保守防御”的经典权衡。第2主成分中，Gs与Tr的强正相关揭示了气孔开闭行为对水分利用效率的直接调控，暗示在水分充足环境下，植物可通过协同提高Gs与Tr以最大化光合碳增益。第3主成分呈现多维性状互作：LA、Gs与SS的正向关联与Pn的负向载荷形成对比，表明高LA及高Gs虽能通过增大SS增强气体交换，但可能导致单位面积光合效率下降（低Pn），这一结果或与气孔开度调节引发的胞间CO₂浓度限有关^[30]。第4主成分中SPAD与C_{mass}的协同上升反映了植物在光合作用和碳储存方面采取了协调一致的策略：即通过增加SPAD来增强碳同化，并将这些同化的碳有效储存于叶片中，以支持植物的生长和生态适应能力^[31]。

本研究通过分析宿迁与苏州乔木叶片功能性状的相关性及主成分结构，揭示了植物性状组合对气候适应的多维策略，与前人研究结果基本一致。然而，本研究仅以8种乔木为研究对象，尚未涵盖区域其他乔木物种以及灌木、草本和藤本等生活型植物，未来需进一步扩大样本范围，探讨不同植物类群叶性状协同适应策略的普适性与特异性。

3.3 苏南苏北气候背景下植物叶功能性状的适应策略

苏南与苏北地区在气候特征上的显著差异，导致了园林乔木在叶功能性状上的表现呈现出明显的区域性适应策略。综合变异系数分析、均值差异、主成分分析与性状协同关系，可归纳出如下主要发现：首先，苏北地区乔木普遍表现出较高的SPAD、Pn、Tr、C_{mass}和较大的SS，表明其倾向于采取“资源获取优先”型的策略，以适应宿迁地区夏季高温多雨、冬季寒冷干旱的温带季风气候环境。这种策略有利于乔木在相对较短的生长

季节内实现快速生长和资源积累。相比之下，苏南乔木在叶干物质含量和气孔密度方面显著高于苏北，反映出其更倾向于“保守型—抗逆性优先”策略，以适应苏州地区高温高湿、伏旱频发的亚热带季风气候。高LDMC意味着更厚实致密的叶组织结构，有助于提高抗热、抗病和耐湿性；而高SD则反映植物对水分利用的精细调控能力，在高温暴雨交替的环境中尤为关键。

值得注意的是，除本研究选取的8种常见园林乔木外，苏南苏北地区尚有其他原生或长期本土化的“乡土树种”，如苏北的国槐 (*Sophora japonica*)、杨树 (*Populus spp.*) 以及苏南的紫薇 (*Lagerstroemia indica*)、乌桕 (*Sapium sebiferum*) 等，这些树种虽未被纳入本研究，但长期在当地自然环境中演化，通常在耐寒、耐涝和抗病虫害方面表现得更为出色^[32]。根据相关文献和城市绿化的实践经验，乡土树种相比外来或改良树种，通常在叶功能性状上更具“抗逆性”或“保守性”，比如较高的叶干物质含量和较小的比叶面积^[33]，这使它们在极端低温、暴雨或干旱等环境条件下，能够保持更高的生存率和生理稳定性。

然而，部分乡土树种虽然适应性强，但其观赏性或城市景观效果可能不如广玉兰、樱花等在城市中广泛应用的外来及改良树种。由此可见，在城市绿化实践中，应综合考虑不同树种之间的功能性状差异，将乡土树种的高耐逆性、低养护成本与外来或改良树种的景观特色相结合，形成既能抵御苏南、苏北气候胁迫又具多元美学价值的复合种植模式。一方面，乡土树种在应对极端气候（如苏北的冬季低温干旱、苏南的高温高湿）时具有长期演化优势，有助于增强城市生态系统的韧性；另一方面，研究树种在生长势、观花观叶效果等方面也发挥着重要补充作用。

通过研究不同气候类型下植物的适应性特征，可以为城市绿化树种选择和配置提供重要参考依据。在苏北地区（温带季风气候），应优先选择资源获取型树种，如樱花、朴树和悬铃木。这些树种具有较高的SPAD、Pn、Tr、C_{mass}、N_{mass}和SS，能够适应温带季风气候下寒旱与湿热交替的特点。种植时需注意土壤改良、冬季防护和水分管理，以增强树种的抗寒性和抗旱性。在苏南地区（亚热带季风气候），则应优先选择保守抗逆型树种，如香樟、广玉兰和桂花。这些树种具有较高的LDMC和SD，能够抵抗高温湿热环境。种植时需注重排水系统建设、病虫害防治和适度修剪，以提高树种的耐热性和耐湿性。这不仅能提升苏南、苏北地区城市绿化体系对气候变化的适应性，也有助于营造兼具生态与景观功能的宜居城市环境。

本研究系统揭示了苏南（亚热带季风气候）与苏北（温带季风气候）园林乔木叶功能性状对气候分异的响应机制与适应策略，验证了植物通过性状组合优化实现环境适应的科学假说。研究发现，苏北乔木通过提升光合效能、增大气孔面积及碳氮积累形成“资源获取优先”策略，以应对寒旱与湿热交替的气候胁迫；而苏南乔木则以高叶干物质含量和密集气孔构建“保守抗逆型”策略，强化对高温高湿环境的耐受性。性状间的协同与权衡关系揭示了植物通过多维性状组合平衡资源获取与抗逆能力的核心适应机制。研究进一步提出，城市绿化应结合乡土树种的抗逆优势与外来树种的景观功能，构建“速生—抗逆复合群落”以增强生态韧性。本研究为跨气候带树种配置、极端气候适应性绿化及生态修复工程提供了关键理论依据，未来需扩展至多生活型植物以完善性状协同适应理论体系。

注：表2内容参考自参考文献[10]；其余图表均由作者自绘/摄。

参考文献

- [1] 孙卫邦. 乡土植物与现代城市园林景观建设[J]. 中国园林, 2003(07): 63-65.
- [2] 魏婧, 徐畅, 李可欣, 等. 超氧化物歧化酶的研究进展与植物抗逆性[J]. 植物生理学报, 2020, 56(12): 2571-2584.
- [3] 刘昊霞, 于瑞新, 穆若兰, 等. 兰州北山不同海拔3种典型绿化树种光合特性研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(10): 1943-1951.
- [4] 金楠, 段志宇, 冯磊, 等. 云南哀牢山南洋木荷叶片功能性状沿树冠高度的垂直变异[J]. 西部林业科学, 2024, 53(06): 39-45.
- [5] NIINEMETS Ü, KEENAN T F, HALLIK L. A Worldwide Analysis of Within-Canopy Variations in Leaf Structural, Chemical and Physiological Traits Across Plant Functional Types[J]. New Phytol, 2015, 205(03): 973-993.
- [6] 李雨桐, 张兴, 曲彦婷, 等. 苏州市常见行道树叶功能性状对空气质量的响应策略研究[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(07): 16-27.
- [7] 陈珊, 张兴, 曲彦婷, 等. 石湖园林植物LES性状对水分环境响应的研究[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(06): 34-44.
- [8] 上官彩霞. 城乡建设用地增减挂钩实施中宅基地置换的模式选择及其对农民福利的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [9] 许超. 苏州城市形象视觉识别系统研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [10] 杨芷航, 张兴, 张洪运, 等. 苏州市城市公园常见植物叶功能性状对热环境的响应机制研究[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(07): 14-24.
- [11] 叶春秀, 庄振刚, 李有忠, 等. 棉花叶片气孔制片方法比较及改良[J]. 分子植物育种, 2014, 12(03): 543-546.
- [12] 秦娟, 孔海燕, 刘华. 马尾松不同林型土壤C、N、P、K的化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(02): 68-76.
- [13] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价[J]. 中国环境科学, 2016, 36(08): 2425-2436.
- [14] 李杰, 杨志强, 刘枝刚, 等. 南宁市土壤硒分布特征及其影响因素探讨[J]. 土壤学报, 2012, 49(05): 1012-1020.
- [15] 高永龙, 孙艳丽, 徐铭泽, 等. 北京百花山落叶阔叶

- [15] 林群落内木本植物的叶片功能性状变异特征[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(04): 40-51.
- [16] LAVOREL S, GRIGULI K J J O E. How Fundamental Plant Functional Trait Relationships Scale-up to Trade-Offs and Synergies in Ecosystem Services[J]. Journal of Ecology, 2012, 100(01): 128-140.
- [17] 刘润红, 梁士楚, 黄冬柳, 等. 漓江河岸带木本植物功能性状跨尺度变异研究[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 8038-8047.
- [18] 段欣妤, 张强, 张良, 等. 2022年长江流域重大干旱发展过程中西太平洋副热带高压的多维度异常特征[J]. 科学通报, 2024, 69(15): 2081-2092.
- [19] 马富举, 李丹丹, 蔡剑, 等. 干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(03): 724-730.
- [20] 程思祺. 温带森林阔叶树幼苗叶茎经济谱及其与防御性状的关系[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- [21] 李闪闪, 刘学勤. 长江中游河漫滩湿地植物功能性状分析[J]. 植物生态学报, 2024, 48(05): 601-611.
- [22] BAOMING D, ZHU Y H, KANG H Z Z, et al. Spatial Variations in Stomatal Traits and Their Coordination with Leaf Traits in Quercus Variabilis Across Eastern Asia[J]. Science of The Total Environment, 2021, 789: 147757.
- [23] 倪榕蔚, 甘玉婷, 杨桂梅, 等. 热岛效应下亚热带城市植被叶气孔权衡特征及其与叶功能性状的关系[J]. 生态学报, 2023, 43(13): 5336-5346.
- [24] DOW G J, BERGMANN D C. Stomatal Development and Leaf Morphogenesis: Coordinated Regulatory Networks in Arabidopsis[J]. Plant Cell, 2022, 34: 120-135.
- [25] LIU H, XU M, PIAO S L, et al. Global Warming Alters Stomatal Traits and Leaf Anatomy in Plants: A Meta-Analysis[J]. Global Change Biology, 2020, 26(03): 1234-1245.
- [26] 梁艳丽, 赵婧, 刘林, 等. 植物细胞壁在植物与病原菌互作中的作用[J]. 分子植物育种, 2016, 14(05): 1255-1261.
- [27] 曹嘉瑜, 刘建峰, 袁泉, 等. 森林与灌丛的灌木性状揭示不同的生活策略[J]. 植物生态学报, 2020, 44(07): 715-729.
- [28] 贡保革. 青藏高原常见植物叶片气孔性状的变异规律及其适应特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2024.
- [29] 韦伊, 刘慧, 贺鹏程, 等. 南亚热带不同演替阶段森林优势树种叶片构建成本与机械抗性的协同关系[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(04): 483-491.
- [30] 赵跃锋, 连少英, 范小玉, 等. 外源2,4-表油菜素内酯对低温胁迫下结球甘蓝幼苗形态建成、光合特性及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(13): 169-174.
- [31] 李弘毅. 基于叶经济谱对重金属污染响应的苏州城市道路植物配置优化研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2023.
- [32] 高斌. 北京市园林绿化中乡土树种的应用问题与对策[J]. 花木盆景, 2025(03): 102-103.
- [33] 刘爽, 李静鹏, 孙余丹, 等. 广东8种乡土绿化树种的叶结构型性状研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2013, 21(02): 175-183.