

张 昊,张 兴,高 飞,等. 城市公园木本植物叶功能性状及其对固碳能力的驱动[J]. 江苏农业科学,2023,51(14):173–180.  
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2023.14.024

# 城市公园木本植物叶功能性状及其对固碳能力的驱动

张 昊<sup>1</sup>, 张 兴<sup>1</sup>, 高 飞<sup>1</sup>, 曲彦婷<sup>2</sup>, 陈西林<sup>3</sup>, 李雨桐<sup>1</sup>, 李弘毅<sup>1</sup>

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

3. 宿迁高速铁路建设发展有限公司, 江苏宿迁 223800)

**摘要:**了解城市木本植物叶水平固碳能力差异,从叶功能性状探讨对固碳能力的驱动路径,明确植物在长期生长过程中通过叶片性状来保持碳收获最大化的权衡策略。以城市公园 20 种常见木本植物为研究对象,测定其叶片碳储量( $C_{\text{mass}}$ )、单位叶面积固碳量( $W_{\text{CO}_2}$ )以及叶功能性状指标,以方差分析、相关性分析、路径分析和多元线性回归分析探究叶性状对固碳能力的影响。通过方差分析发现,木本植物的叶水平固碳能力具有较大差异, $W_{\text{CO}_2}$ 在 4.70 ~ 26.06 g/(m<sup>2</sup>·d) 之间,平均为 11.623 g/(m<sup>2</sup>·d),具有更明显的种间差异; $C_{\text{mass}}$ 在 352.410 ~ 565.290 mg/g 之间,平均为 458.319 mg/g,具有更明显的种内差异。通过相关性分析发现,叶功能性状间存在显著的相关性,其中叶干质量(LDW)、叶干物质含量(LDMC)、叶厚度(LT)、比叶质量(LMA)、单位质量叶氮含量( $N_{\text{area}}$ )、光合氮利用率(PNUE)、单位质量最大净光合速率( $A_{\text{mass}}$ )、气孔导度( $G_s$ )等性状与  $W_{\text{CO}_2}$  和  $C_{\text{mass}}$  均极显著相关。通过路径分析和回归分析发现,单位面积最大净光合速率( $A_{\text{area}}$ )对  $W_{\text{CO}_2}$  具有直接驱动作用,可解释  $W_{\text{CO}_2}$  55.4% 的变化;碳氮比(C/N)、 $A_{\text{mass}}$ 、 $N_{\text{mass}}$  和 PNUE 等对  $C_{\text{mass}}$  具有直接驱动作用,可解释  $C_{\text{mass}}$  30.3% 的变化。城市公园常见木本植物的叶功能性状可作为联系植物光合固碳与碳固存能力的载体,对植物固碳能力具有良好的指示作用。

**关键词:**木本植物;叶功能性状;固碳能力;驱动路径;城市公园

**中图分类号:**S684.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2023)14–0173–07

人口高度密集、环境气候变化剧烈的城市,是二氧化碳(CO<sub>2</sub>)等温室气体的主要排放来源。公园绿地作为城市内具备直接碳汇价值的用地类型之一,能够通过植物群落进行自然固碳。其中,木本植物在碳循环中扮演了重要角色,其固碳能力的评价引起了人们的广泛关注<sup>[1–2]</sup>。叶片是所有植物器官中特征变化最显著的,也是植物进行光合作用固定 CO<sub>2</sub> 的主要场所,叶水平固碳能力是研究植株固碳能力的基础。目前,大部分研究是从环境土壤角度与植物生产力关系等方面展开的,对叶水平功能性状与初级生产力的关系等研究相对较少,且结论

各不相同<sup>[3]</sup>。植物功能性状在反映植物获取、利用和保存资源等方面的能力已经得到公认,近年来已成为生态学和全球变化研究的热点<sup>[4]</sup>。植物叶功能性状对生态功能的变化有显著指示作用,可以将环境、植物个体和生态系统结构、过程与功能紧密地联系起来<sup>[5–6]</sup>。其中,比叶面积(SLA)、比叶质量(LMA)、叶干物质含量(LDMC)、叶片碳氮比(C/N)等是被广泛认为显著影响植物固碳能力的叶功能性状<sup>[7]</sup>。同时,光合氮利用效率(PNUE)、单位质量叶氮含量( $N_{\text{mass}}$ )和单位面积叶氮含量( $N_{\text{area}}$ )均对净光合速率( $P_n$ )具有显著影响,共同体现植物的光合固碳能力<sup>[8]</sup>。因此,为了充分揭示影响叶功能性状驱动植物固碳能力的真实机理,不能仅将植物固碳能力的差异归因于单个或单类叶性状的差异,而应关注叶性状之间共同形成的耦合影响<sup>[9]</sup>。本研究选取江苏省苏州市城市公园 20 种木本植物,采用路径分析和线性回归模型,探讨能够影响及指征固碳能力的关键叶功能性状和驱动路径,综合考虑植物光合固碳能力与碳固存能力,以期在城市公园绿地木本植物质量的提升策略提供科学依据。

收稿日期:2022–11–02

基金项目:黑龙江省科学院双提雁阵项目(编号:STYZ2022ZR01);江苏省研究生科研创新计划(编号:KYCX21\_3054);宿迁交通科研基金(编号:2022Y11);风景园林学“十四五”江苏省重点学科、江苏省研究生工作站共同资助项目(编号:082240006/002/003)。

作者简介:张 昊(1997—),女,河北邢台人,硕士研究生,主要从事地域生态环境与景观规划研究。E-mail:29569116@qq.com。

通信作者:张 兴,教授,研究员,主要从事地域生态环境与景观规划研究。E-mail:2605@usts.edu.cn。

1 材料与方法

1.1 研究区域

江苏省苏州市位于 30°47′~32°2′N、119°55′~121°20′E,地处温带,四季分明,属北亚热带季风气候,年均降水量为 1 100 mm,年均气温 15.7 ℃,1 月平均气温 2.5 ℃,7 月平均气温 28 ℃。本试验选择苏州市建成时间较久且养护较好的 18 个城市公园

作为样地,各类样地条件接近。

1.2 研究对象

在对苏州市城市公园深入调查的基础上,选择 18 个城市公园共有的 20 种常见木本植物作为研究对象(表 1),共选取样本树种 1 086 株,每个树种不少于 54 株,含 17 科 20 属,包括常绿乔木、常绿灌木、落叶乔木和落叶灌木共 4 种生活型,所选木本植物均为生长旺盛且树龄相近的成年植株个体。

表 1 苏州 20 种城市公园常见木本植物

序号	种名	科名	属名	植物生活型
1	银杏( <i>Ginkgo biloba</i> )	银杏科	银杏属	落叶乔木
2	构树( <i>Broussonetia papyrifera</i> )	桑科	构属	落叶乔木
3	广玉兰( <i>Magnolia grandiflora</i> )	木兰科	木兰属	常绿乔木
4	香樟( <i>Cinnamomum camphora</i> )	樟科	樟属	常绿乔木
5	红花檵木( <i>Loropetalum chinense</i> )	金缕梅科	檵木属	常绿灌木
6	海桐( <i>Pittosporum tobira</i> )	海桐花科	海桐花属	常绿灌木
7	二球悬铃木( <i>Platanus orientalis</i> )	悬铃木科	悬铃木属	落叶乔木
8	枇杷( <i>Eriobotrya japonica</i> )	蔷薇科	枇杷属	常绿乔木
9	石楠( <i>Photinia serratifolia</i> )	蔷薇科	石楠属	常绿灌木
10	紫叶李( <i>Prunus cerasifera</i> )	蔷薇科	李属	落叶灌木
11	鸡爪槭( <i>Acer palmatum</i> )	槭树科	槭属	落叶灌木
12	栾树( <i>Koelreuteria paniculata</i> )	无患子科	栾属	落叶乔木
13	无患子( <i>Sapindus saponaria</i> )	无患子科	无患子属	落叶乔木
14	杜英( <i>Elaeocarpus decipiens</i> )	杜英科	杜英属	常绿乔木
15	木芙蓉( <i>Hibiscus mutabilis</i> )	锦葵科	木槿属	落叶灌木
16	山茶( <i>Camellia japonica</i> )	山茶科	山茶属	常绿灌木
17	紫薇( <i>Lagerstroemia indica</i> )	千屈菜科	紫薇属	落叶灌木
18	石榴( <i>Punica granatum</i> )	石榴科	石榴属	落叶灌木
19	桂花( <i>Osmanthus fragrans</i> )	木犀科	木犀属	常绿乔木
20	夹竹桃( <i>Nerium oleander</i> )	夹竹桃科	夹竹桃属	常绿灌木

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。

1.3 试验方法与数据分析

试验于 2021 年 9—11 月进行,样本采集时间在多数植物叶片物质积累最丰富的夏末秋初季节,各待测植株选取向阳面、光照度一致的当年生、完全伸展、无病虫害的成熟新鲜叶片,每个树种采集叶片数量大于 200 张。叶鲜质量的称质量方式为:去除叶片长柄,吸干叶片水分后将其放在电子天平(精确到 0.000 1 g)上称量。将叶片置于 80 ℃烘箱中杀青 3 h,用电子天平称量叶片干质量,按公式  $LDMC(g/g) = LDW(g)/LFW(g)$  计算叶干物质含量,其中:LDW 为叶片干质量;LFW 为叶片鲜质量。用叶面积扫描仪(MICROTEK ScanMaker i800plus)测定待测叶片的面积 LA (cm<sup>2</sup>)。按公式 LMA

(g/cm<sup>2</sup>) = LDW(g)/LA (cm<sup>2</sup>) 计算比叶质量,按公式  $SLA(cm^2/g) = LA(cm^2)/LDW(g)$  计算比叶面积。

在无风晴朗之日 09:00—11:00 采集叶片,使用光合仪(PPsystem, LiCor6400XT, USA)测定净光合速率、蒸腾速率(*T<sub>r</sub>*)和气孔导度(*G<sub>s</sub>*),光源选择 LED 红蓝光源,光照度设定为 1 500 μmol/(m<sup>2</sup> · s),CO<sub>2</sub> 浓度设定为 400 μmol/L,叶室温度设定为 30 ℃,测得单位面积最大净光合速率  $A_{area} [μmol/(m^2 \cdot s)]$ ,计算单位质量最大净光合速率  $A_{mass} [μmol/(g \cdot s)]$ ,计算公式为  $A_{mass} = A_{area} \times SLA \div 10\ 000$ 。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,并使用元素分析仪(EURO EA3000)测定植物叶片中的碳氮含量,以此来计算

叶片单位质量氮含量  $N_{\text{mass}}$  和单位叶面积氮含量  $N_{\text{area}}$  ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), 计算公式为  $N_{\text{area}} = N_{\text{mass}}/SLA \times 10$ 。叶片的光合氮利用效率 [ $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{s})$ ] 计算公式为  $PNUE = A_{\text{mass}}/N_{\text{area}}$ 。

目前广泛应用于确定植物固碳能力的研究方法主要有 2 种, 一是同化法(或称过程法), 即测定植物叶片净光合速率, 推算出单位叶面积固碳量 ( $W_{\text{CO}_2}$ ), 侧重强调植物通过光合作用在一段时间内产生有机物的量来评价植物的光合固碳能力; 二是生物量法(或称收获法), 在植物生物量测定的基础上直接测定植物器官的碳含量即单位质量叶碳含量 ( $C_{\text{mass}}$ ), 侧重强调植物在一定时刻储存在器官中的有机物的量来评价植物的碳固存能力<sup>[10]</sup>。本研究综合考虑 2 种固碳能力评价方法。

植物叶碳含量根据植物的净光合速率计算, 采用同化量法, 测定当天各树种的净同化量的计算公式为

$$P = \sum_{i=1}^j [(P_{i+1} + P_i) \div 2(t_i + t_{i+1}) \times 3\,600 \div 1\,000]。$$

式中:  $P$  表示同化总量,  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $P_i$  表示初测点的瞬时净光合速率;  $P_i$  表示下一测点的瞬时净光合速率,  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $t_i$  表示初测点的瞬时时间,  $\text{h}$ ;  $t_{i+1}$  表示下一测点的时间,  $\text{h}$ ;  $j$  表示测试次数; 3 600 表示 3 600 s/h; 1 000 表示“1 mmol 为 1 000  $\mu\text{mol}$ ”。

用测定日的同化总量换算为测定日固定量为

$$W_{\text{CO}_2} = P \times (1 - 0.2) \times 44/1\,000。$$

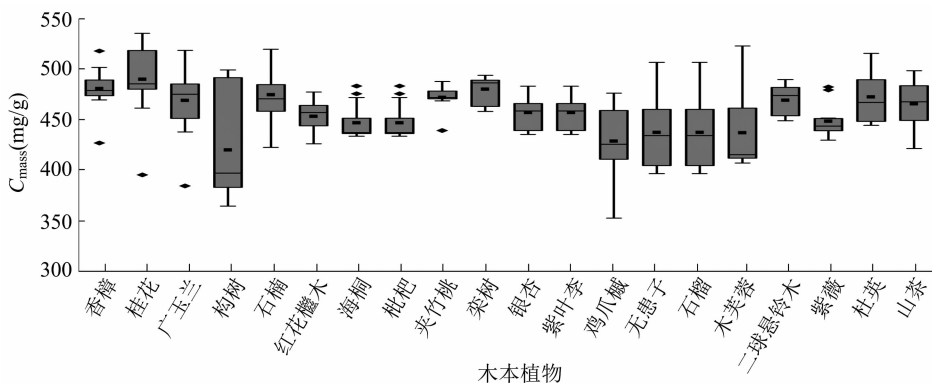


图1 20 种木本植物碳固存能力差异

2.1.2 叶功能性状差异性分析 在 20 种木本植物及其 16 个叶经济谱性状的数据中, 各性状间差异明显(表 2)。在统计分析的 16 个性状中总体变异系数范围较大, 为 20.209% ~ 123.690%, 其中变异系数最大值出现在  $T_r$ , 之后是 LA, 分别为 123.690%、

式中: 44 表示  $\text{CO}_2$  的摩尔质量;  $W_{\text{CO}_2}$  表示单位面积叶片固定  $\text{CO}_2$  的质量,  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

#### 1.4 分析方法

本研究对所采集的样本进行试验测定, 试验指标包括 16 个叶功能性状与 2 个固碳能力指标, 所得数据采用 SPSS 22 软件进行分析。采用方差分析探究 20 种木本植物功能性状间的差异以及光合固碳能力、碳固存能力差异, 采用相关性分析研究木本植物叶功能性状与固碳能力的相关关系。已有研究表明, 当研究变量间具有大量复杂的因果关系时, 路径分析可以解决多元回归方程中无法关注自变量间相关关系的问题, 对于验证多因素耦合影响过程具有巨大优势<sup>[11]</sup>。因此, 本研究采用路径分析和线性回归模型共同探讨叶功能性状对固碳能力的驱动路径。

## 2 结果与分析

### 2.1 城市公园树种固碳能力差异性与叶性状差异性

2.1.1 固碳能力差异性分析 不同树种由于自身生理特性不同, 其固碳释氧能力存在一定的差异性。20 种木本植物叶水平固碳能力差异明显, 且碳固存能力具有更明显的种内差异(图 1), 光合固碳能力具有更明显的种间差异(图 2)。木本植物单位叶面积固定量在 4.70 ~ 26.06  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  之间, 平均为 11.623  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ; 单位质量叶碳含量在 352.410 ~ 565.290  $\text{mg}/\text{g}$  之间, 平均为 458.319  $\text{mg}/\text{g}$ 。

118.999%, 说明两者携带的物种信息较多; 变异系数较小值是 SPAD 与 LDMC, 分别为 20.209%、24.837%, 说明二者是资源轴上较稳定的变量。

### 2.2 叶功能性状间及其与固碳能力的相关性分析

2.2.1 叶功能性状间的相关性分析 本研究木本

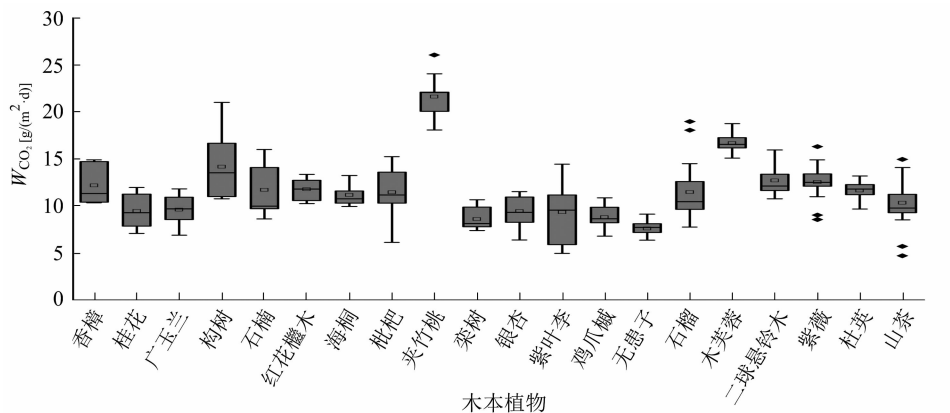


图2 20 种木本植物光合固碳能力差异

表 2 20 种不同生活型园林树种叶性状分布

叶功能性状	平均值 ± 标准差	IQR	峰度	偏度	变异系数 (%)
C/N	22.130 ± 6.559	8.344	0.059	0.504	29.638
LA	38.416 ± 45.715	41.237	5.370	2.240	118.999
LFW	1.040 ± 1.116	1.146	3.839	1.942	107.368
LDW	0.430 ± 0.473	0.395	3.852	2.036	110.223
LDMC	0.433 ± 0.108	0.117	5.990	1.522	24.837
LT	0.032 ± 0.015	0.020	2.490	1.237	47.358
SLA	95.585 ± 67.871	55.789	85.764	7.065	71.006
LMA	0.014 ± 0.006	0.008	3.377	1.223	47.405
N <sub>mass</sub>	22.543 ± 6.795	8.372	1.148	0.990	30.141
N <sub>area</sub>	2.982 ± 1.597	2.122	2.682	1.217	53.546
PNUE	7.123 ± 5.568	4.691	26.065	3.856	78.171
A <sub>mass</sub>	0.152 ± 0.122	0.106	61.581	5.838	80.110
A <sub>area</sub>	16.105 ± 5.715	6.044	0.985	0.910	35.486
G <sub>s</sub>	0.015 ± 0.017	0.014	6.249	2.287	114.192
T <sub>r</sub>	0.449 ± 0.555	0.386	7.417	2.586	123.690
SPAD	43.209 ± 8.732	13.379	-0.775	0.124	20.209

植物的叶功能性状之间普遍存在极显著关联,其中大部分与全球尺度一致<sup>[12]</sup>(图3)。具有极显著正相关关系( $P<0.01$ )的有:C/N和PNUE;LA分别和LFW、LDW、SLA、PNUE、 $A_{\text{mass}}$ 、 $A_{\text{area}}$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ ;LFW分别和LDW、 $A_{\text{area}}$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、SPAD;LDW分别和GS、SPAD;LDMC和 $N_{\text{area}}$ ;LT和LMA、 $N_{\text{area}}$ 、 $A_{\text{area}}$ 、SPAD;SLA和 $N_{\text{mass}}$ 、PNUE、 $A_{\text{mass}}$ ;LMA分别和 $N_{\text{area}}$ 、 $A_{\text{area}}$ 、SPAD; $N_{\text{mass}}$ 分别和 $N_{\text{area}}$ 、 $A_{\text{mass}}$ ;  $N_{\text{area}}$ 和 $A_{\text{area}}$ 、SPAD;PNUE和 $A_{\text{mass}}$ 、 $A_{\text{area}}$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ ;  $A_{\text{mass}}$ 和 $A_{\text{area}}$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ ;  $G_s$ 和 $T_r$ 、SPAD。

具有极显著负相关关系( $P<0.01$ )的有:C/N分别和SLA、 $N_{\text{area}}$ 、 $N_{\text{mass}}$ 、 $A_{\text{mass}}$ ;LA和LT、LMA、 $N_{\text{area}}$ ;LDMC分别和LT、SLA、PNUE、 $A_{\text{mass}}$ 、 $A_{\text{area}}$ ;LT分别和SLA、PNUE、 $A_{\text{mass}}$ 、 $T_r$ ;SLA和LMA、 $A_{\text{mass}}$ 、SPAD;LMA和PNUE、 $A_{\text{mass}}$ 、 $T_r$ ;  $N_{\text{mass}}$ 和PNUE;  $N_{\text{area}}$ 和PNUE、

$A_{\text{mass}}$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ ;PNUE和SPAD; $A_{\text{mass}}$ 和SPAD。

2.2.2 叶功能性状与固碳能力的相关性分析 对20种木本植物的叶性状和叶片固碳能力进行相关性分析,其中LA、LFW、LDMC、LT、 $T_r$ 、PNUE、 $A_{\text{mass}}$ 、 $A_{\text{area}}$ 、 $G_s$ 和SPAD等叶功能性状均与 $W_{\text{CO}_2}$ 之间产生极显著相关性( $P<0.01$ ),LDW、LMA、 $N_{\text{area}}$ 与 $W_{\text{CO}_2}$ 之间产生显著相关性( $P<0.05$ ),SLA、 $N_{\text{mass}}$ 和 $T_r$ 等3个性状与 $W_{\text{CO}_2}$ 间不具有明显相关性;C/N、LDMC、LT、SLA、LMA、 $A_{\text{mass}}$ 、 $G_s$ 和SPAD等叶功能性状与 $C_{\text{mass}}$ 产生极显著相关性( $P<0.01$ ),LDW、 $N_{\text{mass}}$ 、 $N_{\text{area}}$ 、PNUE与 $C_{\text{mass}}$ 产生显著相关性( $P<0.05$ ),LA、LFW、 $N_{\text{area}}$ 、PUNE、 $A_{\text{area}}$ 、 $T_r$ 等5个性状与 $C_{\text{mass}}$ 间不具有明显相关性。结果表明, $W_{\text{CO}_2}$ 和 $C_{\text{mass}}$ 在叶性状间既存在共同相关关系,也存在较大差异(表3)。

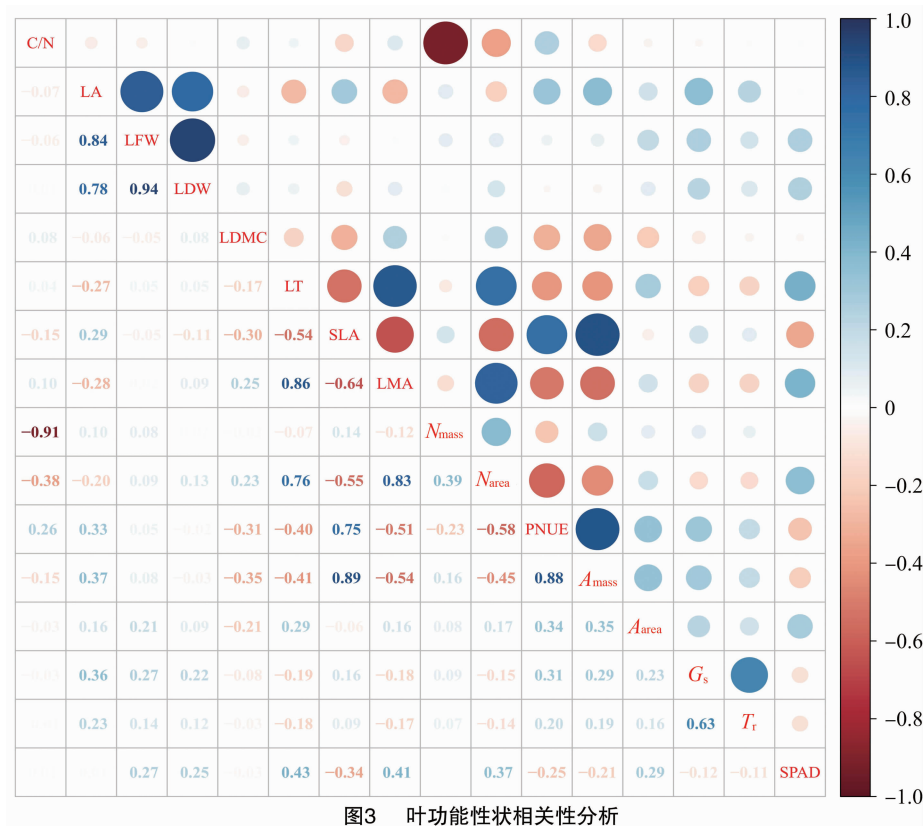


图3 叶功能性状相关性分析

表 3 叶功能性状与固碳能力的相关性分析

叶功能性状	与固碳能力的相关系数	
	$C_{\text{mass}}$	$W_{\text{CO}_2}$
C/N	0.304 **	0.024
LA	-0.038	0.159 **
LFW	0.053	0.196 **
LDW	0.124 *	0.109 *
LDMC	0.145 **	-0.169 **
LT	0.140 **	0.238 **
SLA	-0.206 **	-0.048
LMA	0.167 **	0.116 *
$N_{\text{mass}}$	-0.129 *	0.002
$N_{\text{area}}$	0.105 *	0.108 *
PNUE	-0.129 *	0.274 **
$A_{\text{mass}}$	-0.178 **	0.255 **
$A_{\text{area}}$	0.013	0.745 **
$G_s$	-0.240 **	0.150 **
$T_r$	-0.083	0.09
SPAD	0.202 **	0.270 **

注：\*、\*\* 分别表示相关显著( $P < 0.05$ )、极显著( $P < 0.01$ )。

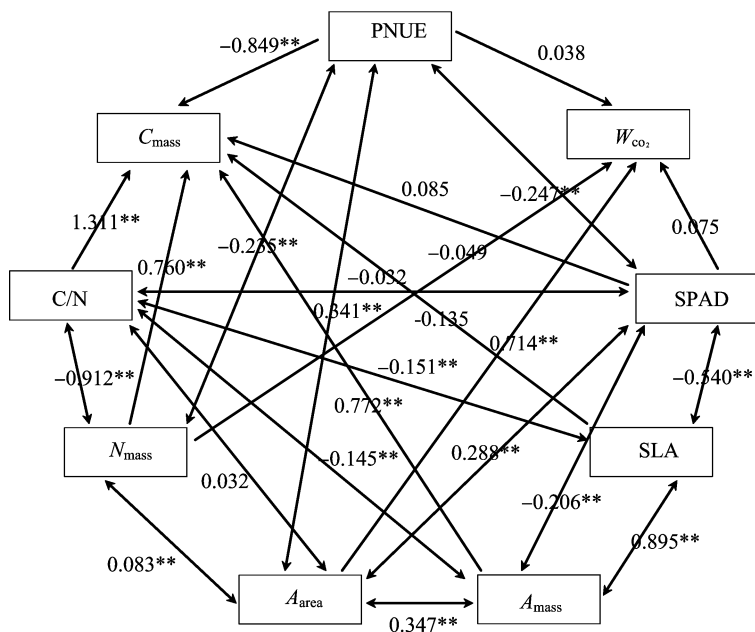
## 2.3 叶功能性状对固碳能力的影响性分析

2.3.1 路径分析 本研究叶功能性状之间互相关联显著,且对于固碳能力具有明显的影响关系,可作为连系  $W_{\text{CO}_2}$  和  $C_{\text{mass}}$  的桥梁,因此选择路径分析以

明确叶功能性状的影响关系并说明变量间的直接效应和间接效应(图4)。结果表明, $W_{\text{CO}_2}$  和  $C_{\text{mass}}$  并不存在直接连系,但二者均受到相关性状的直接驱动。其中, $A_{\text{area}}$  对  $W_{\text{CO}_2}$  产生直接正向驱动,而 LA、LFW、LDW、LDMC、LT、LMA、 $T_r$ 、 $N_{\text{area}}$ 、PNUE、 $A_{\text{area}}$ 、 $G_s$  和 SPAD 等相关性状并不会对  $W_{\text{CO}_2}$  产生直接驱动; $N_{\text{mass}}$ 、C/N 和  $A_{\text{mass}}$  对  $C_{\text{mass}}$  产生直接正向驱动,PUNE 对  $C_{\text{mass}}$  产生直接负向驱动,而 LDMC、LT、SLA、LMA 和  $G_s$  等相关性状并不会对  $C_{\text{mass}}$  产生直接驱动。

2.3.2 多元线性回归分析 上述结果表明部分叶功能性状可直接驱动固碳能力,为进一步明确叶功能性状在路径中的影响程度,将叶功能性状分别对  $C_{\text{mass}}$  和  $W_{\text{CO}_2}$  进行方程拟合(图5)。

将路径分析中极显著的叶功能性状作为自变量,将  $C_{\text{mass}}$  作为因变量进行线性回归分析,得到模型公式为  $C_{\text{mass}} = 243.274 + 3.646 \times N_{\text{mass}} + 166.292 \times A_{\text{mass}} + 6.426 \times \text{C/N} - 4.856 \times \text{PUNE}$ ,模型  $R^2$  值为 0.303, ( $F = 38.624, P = 0.000^{**} < 0.05$ );将路径分析中极显著的叶功能性状作为自变量,将  $W_{\text{CO}_2}$  作为因变量进行线性回归分析,得到模型公式为  $W_{\text{CO}_2} = 3.966 + 0.475 \times A_{\text{area}}$ ,模型  $R^2$  值为 0.554, ( $F = 445.588, P = 0.000^{**} < 0.05$ )。



$$\chi^2=7.750(P=0.982; df=18), \chi^2/df=0.431$$

RMSEA = 0.000; GFI=0.989; RMR=0.011; CFI=1.003; NFI=0.998; NNFI=1.007; TLI=1.007; AGFI=0.972。图中数字为标准化路径系数, 已忽略标准化路径系数小于 0.01 的路径; 单箭头表示影响关系, 双箭头表示相关关系

图4 植物叶功能性状对叶水平固碳能力的驱动路径

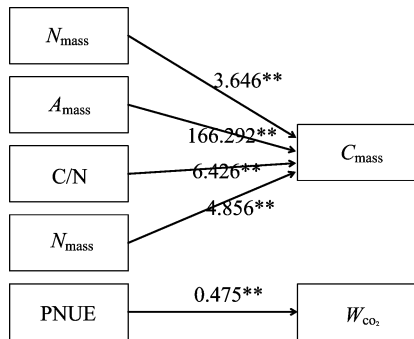


图5 植物叶功能性状对叶水平固碳能力的回归分析示意

### 3 讨论与结论

#### 3.1 固碳能力与叶功能性状特征分析

本研究中  $T_r$  和 LA 的种间变异较大, SPAD 和 LDMC 的种间变异较小, 这与前人的研究结果基本一致, 说明蒸腾作用在木本植物种间具有较大的差异和良好的指示作用<sup>[13-14]</sup>。进而可知, 木本植物通过增加 LA 来弥补由于 SLA 减小而导致的碳摄取效率损失的生理现象在种间较显著, 且值得进一步探讨。而 LDMC 种间差异较小, 作为反映植物对养分元素保有能力的指标, 表明城市公园木本植物处于适宜的气候和良好的水土环境<sup>[15]</sup>。

本研究选取的 20 种园林木本植物中  $W_{co_2}$  和

C<sub>mass</sub> 均存在不同程度的差异。光合固碳能力强调资源获取, 具有更明显的种间差异; 碳固存能力侧重资源利用储存, 具有更小的种间差异和更大的种内差异。这进一步说明光合固碳能力在指征植物自身物种特性时可能具备更大的优势, 而碳固存能力作为跨种间的研究指标可能会更加稳定。

#### 3.2 叶功能性状与固碳能力的相关关系

本研究中的 SLA 与 LDMC 呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )、LMA 与 LDMC 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 这与全球叶性状之间的相关关系基本相同。叶片生理性状可以反映植物的生长代谢情况, 本研究中  $T_r$  和  $G_s$  呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 LMA 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 这与多数研究一致, 展现了树种可以通过较强的光合能力节约叶形态投入的适应策略。

本研究进一步印证了张林等多位学者的研究结果, 即植物叶性状与固碳能力之间具有相关性, 部分性状可在一定程度上表示植物的碳同化能力, 如 SLA 大、 $N_{mass}$  高的植物其叶片净光合速率大, 能有效进行光合作用并快速储存周边环境中的养分<sup>[16-18]</sup>。

#### 3.3 叶功能性状对固碳能力的驱动路径

在路径分析中发现, SPAD、C/N、A<sub>area</sub>、 $N_{mass}$ 、

PUNE、 $A_{\text{mass}}$  和 SLA 等涉及到叶片生理、化学和结构性状的 7 个叶功能性状与  $W_{\text{CO}_2}$  和  $C_{\text{mass}}$  具有显著影响性。 $A_{\text{area}}$  和  $A_{\text{mass}}$  在  $W_{\text{CO}_2}$  和  $C_{\text{mass}}$  之间显示出明显差异,即  $W_{\text{CO}_2}$  与叶功能性状中的面积归一化联系更紧密, $C_{\text{mass}}$  与叶功能性状中的质量归一化更密切,印证了 2 种假说在联系植物固碳能力时可能独立存在<sup>[19]</sup>。其中, $W_{\text{CO}_2}$  仅受  $A_{\text{area}}$  直接驱动,表明叶功能性状在植物光合固碳过程中变化复杂。本研究中 PUNE 和 SLA 并未对  $W_{\text{CO}_2}$  产生直接驱动作用,说明二者虽可以较好反映植物的光合固碳能力,但也可能更易受到如  $N_{\text{mass}}$ 、SPAD 和  $A_{\text{area}}$  等性状的间接驱动,而 PUNE 对  $C_{\text{mass}}$  形成显著的负向路径,说明在评价植物碳固存能力时植物本身的 PUNE 不可忽视。此外,在 7 个叶功能性状中 SLA 作为较易测得的叶性状指标,对  $C_{\text{mass}}$  和  $A_{\text{area}}$  具备明显的驱动效应,表明其具备一定的直接指示价值。

为进一步明确植物在长期生长过程中通过叶片性状来保持碳收获最大化的权衡策略,本研究通过回归分析对比得出  $W_{\text{CO}_2}$  和  $C_{\text{mass}}$  均可以和叶功能性状形成良好的线性关系,其中  $C/N$ 、 $A_{\text{mass}}$ 、 $N_{\text{mass}}$ 、PUNE 共同阐释了树种的碳同化差异并直接反映其最大化构建途径:即较高  $C/N$ 、 $A_{\text{mass}}$ 、 $N_{\text{mass}}$  和较低 PUNE 的植物叶碳固存能力更强;较高  $A_{\text{area}}$  的植物叶光合固碳能力更强,而 SPAD 和  $N_{\text{mass}}$  的直接影响并不显著,这可能与 SPAD 和  $N_{\text{mass}}$  较小的种间差异有关。

### 3.4 结论

$W_{\text{CO}_2}$  和  $C_{\text{mass}}$  与叶功能性状直接相关,其中  $N_{\text{area}}$  没有和  $W_{\text{CO}_2}$  形成明显驱动关系,这可能是由于本研究所选木本植物涉及科属较多,其叶片氮分配及  $\text{CO}_2$  扩散阻力的差异较大<sup>[20]</sup>。SPAD 均与  $W_{\text{CO}_2}$  及  $C_{\text{mass}}$  产生极显著相关关系,但均未与  $W_{\text{CO}_2}$  和  $C_{\text{mass}}$  形成明显驱动路径,也可能是由于本研究中部分树种冠高较高,为避免上层叶片光损伤,其通过降低光吸收并增强氮元素及叶绿素利用能力的碳权衡现象较显著<sup>[21]</sup>。因此,本研究所提出的叶功能性状对固碳能力的驱动路径是否会在植物生活型种类、绿地类型之间产生结果差异还需进一步研究。总而言之,SPAD、 $C/N$ 、 $A_{\text{area}}$ 、 $N_{\text{mass}}$ 、PNUE、 $A_{\text{mass}}$  和 SLA 等叶性状之间明确的权衡关系共同表明,植物固碳能力不仅取决于净光合速率或叶片质量,而是由多种叶功能性状共同权衡决定的,但这种驱动关系在非城市公园等人工扰动较低的环境及环境胁迫中,是否存在或发生改变尚不明确<sup>[22-24]</sup>。因此,为全面了

解植物功能性状对固碳能力的驱动路径,在后续的研究中可选择实验室环境加以验证,并针对不同生活型植物及不同生长环境、整株水平(包括根、茎、枝、叶柄和叶)进行更多的系统研究。

### 参考文献:

- [1] 李宸宇,朱建华,张峰,等. 基于 NbS 的北京市乔木林固碳能力分析[J]. 北京林业大学学报,2021,43(6):13-22.
- [2] 郭晖. 河南省郑州市公园绿地常见植物固碳释氧能力分析[J]. 江苏农业科学,2017,45(15):103-106.
- [3] 曹小玉,赵文菲,李际平,等. 中亚热带几种典型森林土壤养分含量分析及综合评价[J]. 生态学报,2022,42(9):3525-3535.
- [4] 陈莹婷,许振柱. 植物叶经济谱的研究进展[J]. 植物生态学报,2014,38(10):1135-1153.
- [5] 张德顺,刘鸣. 基于“植物功能性状-生态系统服务”评价框架的园林树种选择方法——以上海为例[J]. 中国园林,2020,36(2):106-111.
- [6] Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum[J]. Nature,2004,428(6985):821-827.
- [7] Ishida A, Nakano T, Yazaki K, et al. Coordination between leaf and stem traits related to leaf carbon gain and hydraulics across 32 drought-tolerant angiosperms[J]. Oecologia,2008,156(1):193-202.
- [8] 陈高路,陈林,庞丹波,等. 贺兰山 10 种典型植物固碳释氧能力研究[J]. 水土保持学报,2021,35(3):206-213,220.
- [9] 张磊,吕光辉,蒋腊梅,等. 干旱区荒漠植物初级生产力及碳储量与功能性状之间的关系[J]. 新疆大学学报(自然科学版),2020,37(1):1-12.
- [10] 张颖. 建筑垃圾堆山公园植物群落固碳效益量化与优化研究——以天津南翠屏公园为例[D]. 天津:天津大学,2019.
- [11] Yu M F, Pan Y T, Yang L L, et al. Response of sediment microbial communities to the rural wastewater in the pond-ditch circulation system[J]. Frontiers in Environmental Science,2021,9:717458.
- [12] Osnas J L D, Lichstein J W, Reich P B, et al. Global leaf trait relationships: mass, area, and the leaf economics spectrum[J]. Science,2013,340(6133):741-744.
- [13] 张姗姗,张兴,曲彦婷,等. 留园植物叶性状及其叶经济谱研究[J]. 北方园艺,2022(14):57-65.
- [14] Valencia E, Gross N, Quero J L, et al. Cascading effects from plants to soil microorganisms explain how plant species richness and simulated climate change affect soil multifunctionality[J]. Global Change Biology,2018,24(12):5642-5654.
- [15] 靳莎,闫淑君,黄柳菁,等. 植物叶功能性状的权衡研究进展[J]. 四川林业科技,2019,40(5):96-103.
- [16] 张林,罗天祥. 植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展[J]. 植物生态学报,2004,28(6):844-852.
- [17] 宋贺,于鸿莹,陈莹婷,等. 北京植物园不同功能型植物叶经济谱[J]. 应用生态学报,2016,27(6):1861-1869.
- [18] 庞志强,卢炜丽,姜丽莎,等. 滇中喀斯特 41 种不同生长型植物叶性状研究[J]. 广西植物,2019,39(8):1126-1138.

时成立,杨青松,麻艳威,等. 发酵木屑和木霉生物有机肥复混基质对容器梨苗的培育效果[J]. 江苏农业科学,2023,51(14):180-186.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.14.025

# 发酵木屑和木霉生物有机肥复混基质 对容器梨苗的培育效果

时成立<sup>1</sup>, 杨青松<sup>2</sup>, 麻艳威<sup>1</sup>, 徐阳春<sup>1</sup>, 董彩霞<sup>1</sup>, 王中华<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学资源与环境学院, 江苏南京 210095; 2. 江苏省农业科学院果树研究所, 江苏南京 210000)

**摘要:**以发酵木屑、木霉生物有机肥部分替代泥炭与珍珠岩复配成不同基质配比,研究其对容器梨苗生长发育的影响。试验设置如下 5 个处理:T0-3(50% 泥炭+20% 珍珠岩+30% 发酵木屑),T1-3(40% 泥炭+20% 珍珠岩+10% 木霉生物有机肥+30% 发酵木屑),T0-4(40% 泥炭+20% 珍珠岩+40% 发酵木屑),T1-4(30% 泥炭+20% 珍珠岩+10% 木霉生物有机肥+40% 发酵木屑)。结果表明:(1)不同配比基质的碱解氮、有效钾及有效镁含量均显著高于对照(泥炭+蛭石),添加木霉生物有机肥不同程度地增加了基质中的碱解氮、有效钾、有效钙和有效镁含量。(2)与对照相比,添加木霉生物有机肥处理的植株生物量显著提高,T1-3、T1-4 处理梨苗总干质量分别比对照提高 27.43%、51.41%;含木霉生物有机肥的基质处理植株生物量整体上也优于不含木霉生物有机肥处理。(3)T0-3、T0-4 处理对容器苗各部位养分含量的影响与对照相比总体上无明显差异,而 T1-3、T1-4 处理的植株养分含量有所增加,其中 T1-4 处理根部 Mg、Fe、Zn 元素含量显著高于对照,分别增加了 35.04%、13.40%、49.39%。综上所述,发酵木屑混配基质在容器梨苗培育过程中的效果能够达到甚至优于泥炭基质的效果,用发酵木屑替代泥炭制备容器梨苗培育基质具有可行性。添加木霉生物有机肥的复混基质对植株生长发育有更显著的促进作用,其中 T1-4(30% 泥炭+20% 珍珠岩+10% 木霉生物有机肥+40% 发酵木屑)基质处理最为理想。

**关键词:**梨;容器育苗;基质;发酵木屑;木霉;生物有机肥

**中图分类号:**S661.204 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)14-0180-07

随着现代化生态农业的迅速发展和无土栽培技术的广泛应用,育苗基质愈来愈受到关注<sup>[1]</sup>。泥炭是最常用的育苗基质材料,但泥炭是不可再生资源,并且价格昂贵,使其应用受到限制。因此,可部

分替代泥炭的新型育苗基质材料的开发和应用显得尤为重要<sup>[2]</sup>。在果树生产中,因整形修剪等原因,每年都会产生大量的废弃枝条,这些废弃枝条长期堆积,不仅会造成资源浪费,而且会影响树体的正常发育<sup>[3]</sup>。因此,如何合理利用废弃果树枝条,减少资源浪费是目前亟需解决的难题。研究发现,将废弃枝条粉碎后发酵可以替代泥炭作为育苗基质原料,能够降低育苗成本,减少环境污染,实现农林废弃物资源的循环利用,为发展现代化绿色农业提供思路<sup>[4-6]</sup>。木霉菌在自然界广泛存在且具有促进作物生长、生物防治等功能,目前已在辣椒、茶

收稿日期:2022-09-01

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-28);江苏省宿迁市重点研发计划(编号:L202107)。

作者简介:时成立(1999—),男,河南南阳人,硕士研究生,从事梨养分管理方面的研究。E-mail:2426146249@qq.com。

通信作者:王中华,硕士,副研究员,从事梨栽培技术方面的研究。E-mail:wzh925@163.com。

[19]何芸雨,郭水良,王 喆.植物功能性状权衡关系的研究进展[J].植物生态学报,2019,43(12):1021-1035.

[20]黄 凯.物种和群落水平上外来入侵植物与共生本地植物叶功能性状和养分循环的差异及环境的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2021.

[21]郭美玲,姚步青,石国玺,等.高寒草甸植物叶片碳含量及其可塑性 with 系统发育的关系[J].生态学杂志,2018,37(6):1841-1848.

[22]王园博,赵锐锋,张丽华,等.黑河中游湿地不同植物群落土壤

有机碳分布及影响因素[J].草业科学,2020,37(5):833-844.

[23]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(6):34-44,77.

[24]Gago J,de Menezes D D,Figueroa C M,et al. Relationships of leaf net photosynthesis, stomatal conductance, and mesophyll conductance to primary metabolism: a multispecies meta-analysis approach[J]. Plant Physiology,2016,171(1):265-279.