

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.04.036

苏南地区常见公路绿化树种光合固碳特征研究

万丽娟^{1,2}, 张毅^{1,2}, 程东祥^{1,2}, 郑朝成^{1,2}, 黄亚楠^{1,3}

(1. 南京交通职业技术学院, 南京 211188; 2. 江苏省交通节能减排工程技术研究中心, 南京 211188;
3. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098)

摘要: 本文以苏南地区常见的30种公路绿化树种为研究材料, 利用Li-6400便携式光合测定仪, 测定不同光强梯度下光合作用的光响应特性及树木光合日变化, 对30个树种的日净固碳量和光合生理拟合参数进行聚类分析和因子分析. 结果表明: 香樟的固碳量最大($(11.957 \pm 1.053) \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), 其次为碧桃、紫薇、无患子、杨树、竹子、广玉兰、朴树, 固碳量最小的为紫叶李($(3.888 \pm 0.204) \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), 香樟和紫叶李的日净固碳量有极显著差异($P < 0.01$); 无患子、洒金珊瑚、银杏在苏南地区生长适应性较好, 其次为香樟、木槿、碧桃等; 建议在苏南地区公路碳汇林建设中可以优先选用香樟、碧桃、紫薇、朴树、无患子、竹子、桂花、榆树、梅花、腊梅这10个树种.

关键词: 公路碳汇林; 日固碳量; 光合生理参数; 聚类分析

中图分类号: S727.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)04-0881-08

The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species for highway greening in southern Jiangsu

WAN Li-Juan^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}, CHENG Dong-Xiang^{1,2}, ZHENG Chao-Cheng^{1,2}, HUANG Ya-Nan^{1,3}

(1. Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China; 2. Jiangsu Engineering Technology Research Center for Energy Conservation and Emission Reduction of Transportation, Nanjing 211188, China;
3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, thirty common highway afforestation tree species in southern Jiangsu province were selected as the research materials, and a portable Li-6400 photosynthesis apparatus is used to measure the responses of photosynthesis to different light intensities and the photosynthetic diurnal variation, furthermore, cluster analysis and factor analysis were used to analyze the daily net carbon sequestration and examine the fitting physiological parameters of photosynthesis of thirty tree species. The results showed that *Cinnamomum camphora* has the highest carbon fixation ($(11.957 \pm 1.053) \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), followed by *Prunus persica* Batsch. var. *duplex* Rehd., *Lagerstroemia indica*, *Sapindus mukorossi*, *Populus euramevicana*, *Bambusa multiplex*, *Magnolia grandiflora*, and *Celtis sinensis*, and *Prunus cerasifera* var. *atropurea* has the lowest carbon fixation ($(3.888 \pm 0.204) \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$). The daily net carbon of sequestration *Cinnamomum camphora* and *Prunus cerasifera* var. *atropurea* has extremely significant difference ($P < 0.01$). *Sapindus mukorossi*, *Aucuba japonica* and *Ginkgo biloba* have better growth and adaptability in southern Jiangsu, followed by *Cinnamomum camphora*, *Hibiscus syriacus*,

收稿日期: 2017-06-13

基金项目: 江苏省交通运输科技项目(2016Y21-1)

作者简介: 万丽娟(1978-), 女, 山东章丘人, 助理研究员, 博士, 研究方向为环境科学. E-mail: bartty_ym@163.com

通讯作者: 张毅. E-mail: zy@jscd.gov.cn

Prunus persica Batsch. var. *duplex* Rehd. and et al. so we suggested that *Cinnamomum camphora*, *Prunus persica* Batsch. var. *duplex* Rehd., *Lagerstroemia indica*, *Celtis sinensis*, *Sapindus mukorossi*, *Bambusa multiplex*, *Osmanthus fragrans*, *Ulmus pumila*, *Armeniaca mume*, and *Chimonanthus praecox* can be preferred in as priority selection are recommended for road carbon sink forests construction in southern Jiangsu.

Keywords: Road sink forest; Diurnal net carbon fixation; Photosynthetically physiological parameter; Cluster analysis

1 引言

随着世界经济的不断发展,人类所面临的环境生态问题也日益突出.因为树木能够通过光合作用将大气中的二氧化碳吸收并储存起来,降低了大气中二氧化碳的浓度,减缓温室效应,所以森林在碳汇中扮演着重要角色^[1-3].林业碳汇具有巨大的碳汇能力,在《京都议定书》及《联合国气候变化框架公约》中与林业相关的措施受到高度关注,并成为各国应对气候变化和履行国际减排义务的重要途径.我国交通部门已成为重要能耗和温室气体排放部门,其中公路交通贡献率最大.因此,寻求有效的技术和政策措施以促进我国公路交通节能、实现温室气体减排十分必要.

公路绿化带不仅能够起到防沙、防眩及景观效果,而且还能产生生态效应改善道路空气环境.植物能够对道路空气环境起到净化、滞尘、降噪、降温效应及改善城市的物质代谢和能量循环^[4].但是,在保障行车视觉安全的前提下使固碳量最大化的公路碳汇林的造林活动中涉及大量不同的造林树种,在相同的立地条件和林分结构下,个体树种的固碳能力决定了整个林分的固碳能力.因此,要提高公路碳汇林造林质量及其碳储量,了解树种的固碳性能及生态生理特性至关重要,也是决定整个公路碳汇林质量的关键因素.因此,研究并明确不同树种的固碳能力大小及生态生理特性,对于合理筛选公路碳汇林树种,提高公路碳汇林质量,充分发挥公路碳汇林的碳汇功能特别重要.

固碳能力是树木的净光合作用能力,即树木同化二氧化碳的能力.树木的生长过程中积累的碳素化合物最终来自于光合作用所固定的 CO₂,确定树木固碳能力的一个重要的方法即研究不同树种的固碳能力大小及生态生理特性,对于合理筛选公路碳汇林树种,提高公路碳汇林质量,充分发挥公路碳汇林的碳汇功能特别重要.

性^[5-9].但对于相同或相近条件下,不同树种固碳能力比较研究却报道较少^[10-13],国内已见针对贵州、浙北和河北等地区的优选高固碳量、适宜生长的绿化树种等方面的文献报道^[14-17],但对于苏南地区的不同绿化树种的固碳能力比较研究未见报道.本研究从树种的光合作用特征角度出发,从树种生理特征指标及其日净固碳量两个方面对苏南地区 30 种常见公路绿化树种进行系统的比较分析,研究其光合固碳能力的优劣,为苏南地区公路碳汇林建设中树种的优选提供参考依据.

2 材料和方法

2.1 试验区概况

本研究试验区选在江苏省南京市,其位于江苏省西南部,地理坐标为北纬 31°14′至 32°37′,东经 118°22′至 119°14′,属北亚热带湿润气候,四季分明,雨水充沛.本实验区常年平均降雨量 1106.5 毫米,年平均温度 15.4℃,全年日照时数 1900 h 左右.

2.2 材料

选取苏南地区 30 种常见绿化造林树种(见表 1),各测试树种均选自江苏省林业科学研究所内,环境、立地和管理条件一致,全部树木为移栽实生苗,同期种植.目前树龄均为 10~15a,生长健康无明显病虫害.

2.3 方法

2.3.1 净光合速率日变化测定 试验测定于 2016 年 9 月进行,选择 15 个光照充足的晴天,每个树种选择 3 株长势相近的样木,测定叶片选取朝向一致、无病虫害、从植株顶部展开叶往下数第 5~7 叶近叶尖位置,采用美国 Li-Cor 公司制造的 Li-6400 便携式光合仪进行光合生理生态指标的数据采集.每日于 6:00~18:00 每隔 2 h 测定 1 次.被测叶面积 6 cm²,每个树种取 3 株样木的平均值.

表1 苏南地区30种常见绿化造林树种

Tab.1 Thirty common tree species in southern Jiangsu

序号 Serial number	树种 Species	科 Family	属 Genus
1	榉树 <i>Zelkova schneideriana</i>	榆科	榉树属
2	朴树 <i>Celtis sinensis</i>	榆科	朴属
3	榆树 <i>Ulmus pumila</i>	榆科	榆属
4	紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i> var. <i>atropurea</i>	蔷薇科	李属
5	碧桃 <i>Prunus persica</i> Batsch. var. <i>duplex</i> Rehd.	蔷薇科	李属
6	枇杷 <i>Eriobotrya japonica</i>	蔷薇科	枇杷属
7	樱花 <i>Prunus serrulata</i>	蔷薇科	樱属
8	红叶石楠 <i>Photinia fraseri</i>	蔷薇科	石楠属
9	梅花 <i>Armeniaca mume</i>	蔷薇科	杏属
10	桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	木犀科	木犀属
11	女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	木犀科	女贞属
12	无患子 <i>Sapindus mukorossi</i>	无患子科	无患子属
13	银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	银杏科	银杏属
14	洒金珊瑚 <i>Aucuba japonica</i>	山茱萸科	桃叶珊瑚属
15	竹子 <i>Bambusa multiplex</i>	禾本科	竹属
16	白玉兰 <i>Magnolia denudata</i>	木兰科	含笑属
17	深山含笑 <i>Michelia maudiae</i>	木兰科	含笑属
18	乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i>	木兰科	含笑属
19	马褂木 <i>Liriodendron chinense</i>	木兰科	鹅掌楸属
20	广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	木兰科	木兰属
21	珊瑚树 <i>Viburnum awabuki</i>	忍冬科	荚蒾属
22	悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i>	悬铃木科	悬铃木属
23	紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	千屈菜科	紫薇属
24	杨树 <i>Populus euramevicana</i>	杨柳科	杨属
25	梧桐 <i>Firmiana plataniifolia</i>	梧桐科	梧桐属
26	腊梅 <i>Chimonanthus praecox</i>	蜡梅科	蜡梅属
27	七叶树 <i>Aesculus chinensis</i>	七叶树科	七叶树属
28	三角枫 <i>Acer buergerianum</i>	槭树科	槭属
29	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	樟科	樟属
30	木槿 <i>Hibiscus syriacus</i>	锦葵科	木槿属

固碳量计算:绘制每个树种净光合速率日变化曲线图,其同化量是净光合速率曲线和时间横轴围合的面积,可以使用简单积分法计算各种植物在测定当日的净同化量^[18].植物日同化量按照公式(1)计算如下:

$$P = \sum_{i=1}^j ((P_{i+1})/2) \cdot (t_{i+1} - t_i) \cdot 3600/1000 \quad (1)$$

式中:为单位叶面积的日同化量(mmol); P_i 为初测点的瞬时光合作用速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); P_{i+1} 为*i*+1测点的瞬时光合作用速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); t_i 为初测点的瞬时时间(h); t_{i+1} 为*i*+1测点的瞬时时间(h);*j*为测试次数;3600为每小时3600 s;1000为1000 μmol .

一般植物晚上暗呼吸消耗量按照白天同化量的20%计算,则单位叶面积日净固碳量按照公式

(2)计算如下:

$$W_{\text{CO}_2} = P \cdot (1 - 0.2) \cdot 44/1000 \quad (2)$$

式中: W_{CO_2} 为单位叶面积的日净固定 CO_2 质量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);44为 CO_2 的摩尔质量($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$),并用 one-way ANOVA 分析检验树种净同化量及日净固碳量的显著差异性.

2.3.2 光合作用-光响应测定 利用 Li-6400 内置 LED 人工光源,在 15 个晴天 9:00~11:00 测定净光合速率的光强响应基础数据,每个树种作 3 个重复测定.光合有效辐射(PAR)由强到弱依次设定为:1500、1200、1000、800、600、400、200、100、50、20、0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,每个光合有效辐射下适应 3~5min 后测定其各项生理指标.

2.3.3 光响应数据处理 在 Excel 中将采集到的数据进行筛选,剔除异常数据,将经过筛选的数据分树种、光强计算其净光合速率平均值.在此基础

上利用 SPSS19.0 统计软件,采用非直角双曲线模型进行树种光响应曲线拟合.通过非直角双曲线模型,拟合 P_n-I ,并得到如下参数:最大净光合速率(A_{max})、表观量子效率(Q)、暗呼吸速率(Rd);通过模型变换利用 P_n 达到 A_{max} 一定程度时解方程得到 I 的值来估算光饱和点(LSP),用 P_n 为 0 时 I 的值为光补偿点(LCP).利用 one-way ANOVA 分析检验树种各生理特征指标的差异性.

非直角双曲线模型如下:

当 $k \neq 0$ 时,变形为:

$$P_n = \frac{Q \cdot light + A_{max} - \sqrt{(Q \cdot I + A_{max})^2 - 4 \cdot k \cdot Q \cdot I \cdot A_{max}}}{2k} - RD \tag{5}$$

式中: P_n 为净光合速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), RD 为暗呼吸速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

3 结果与讨论

3.1 树种固碳量分析

3.1.1 树种净同化量和日净固碳量分析 净固碳量高说明此树种与外界交换的 CO_2 和 O_2 较多,积累于体内的有机质含量高^[19].根据公式(1)和(2)的计算,得到 30 种树种的净同化量和日净固碳量(见表 2),由表 2 可知,香樟的净同化量和日净固

$$KP^2 - P(Q \cdot I + A_{max}) + Q \cdot I \cdot A_{max} \tag{3}$$

式中:为总光合作用速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), k 为反映光合曲线弯曲的凸度, Q 为表观量子效率, I 为光量子通量密度($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), A_{max} 为最大净光合速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

当 $k=0$ 时,非直角双曲线模型退化为直角双曲线模型,

$$P_n = \frac{Q \cdot I \cdot A_{max}}{Q \cdot I + A_{max}} - RD \tag{4}$$

碳量最大,分别为 $339.689 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $11.957 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,紫叶李的净同化量和日净固碳量最小,分别为 $110.454 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $3.888 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,同时,香樟与紫叶李有着显著的差异,且与其他树种有着明显的差异.碧桃、紫薇、无患子、杨树、竹子、广玉兰和朴树之间无显著性差异,但与其他树种存在显著性差异.深山含笑、乐昌含笑、梅花、桂花、榆树、珊瑚树、腊梅和女贞之间无显著性差异.同时,各树种的净同化量和日净固碳量具有基本一致的显著差异性.

表 2 30 种树种日净固碳量

Tab.2 Net diurnal carbon fixation of thirty species

序号	树种	日净同化量 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	日净固碳量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	序号	树种	日净同化量 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	日净固碳量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
1	榉树	140.058±9.479klm	4.930±0.333klm	16	二桥木兰	124.130±8.561mn	4.369±0.301mn
2	朴树	222.463±5.278defg	7.831±0.185defg	17	深山含笑	211.288±17.834efg	7.437±0.627efg
3	榆树	203.493±17.215fghi	7.163±0.605fghi	18	乐昌含笑	209.402±10.716efg	7.371±0.377efg
4	紫叶李	110.454±5.818n	3.888±0.204n	19	马褂木	134.540±4.195lmn	4.736±0.147lmn
5	碧桃	270.486±23.054b	9.521±0.811b	20	广玉兰	219.514±9.251defg	7.727±0.325defg
6	枇杷	160.175±7.795jkl	5.638±0.274jkl	21	珊瑚树	200.502±9.782ghi	7.058±0.344ghi
7	樱花	129.753±11.140mn	4.567±0.392mn	22	悬铃木	164.365±15.102jk	5.786±0.531jk
8	红叶石楠	163.670±22.987jk	5.761±0.809jk	23	紫薇	257.578±21.25026bc	9.067±0.748bc
9	梅花	205.427±9.501efgh	7.231±0.334efgh	24	杨树	233.497±21.507cde	8.219±0.757cde
10	桂花	205.172±13.537efgh	7.222±0.476efgh	25	梧桐	117.774±3.883mn	4.146±0.136mn
11	女贞	193.297±25.665ghi	6.804±0.903ghi	26	腊梅	200.248±13.791ghi	7.049±0.485ghi
12	无患子	243.506±16.194cd	8.571±0.570cd	27	七叶树	178.195±17.969hij	6.273±0.632hij
13	银杏	159.482±12.644jkl	5.614±0.445jkl	28	三角枫	174.522±21.709ij	6.143±0.764ij
14	洒金珊瑚	142.921±4.274klm	5.031±0.150klm	29	香樟	339.690±29.931a	11.957±1.053a
15	竹子	232.566±20.775cdef	8.186±0.731cdef	30	木槿	177.768±8.806hij	6.257±0.309hij

同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

3.1.2 绿化树种日净固碳量聚类分析 从 30 个树种的光合日变化数据(见表 2)和 30 种树固碳能力聚类分析图(见图 1)可以看出,根据 30 种树种的日净固碳量高低可将其分为 5 类,并根据日净固碳量值进行类间排序.依次为:第一类(日净固碳量极高):香樟($11.957 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);第二类(日净固碳量高):碧桃($9.521 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、紫薇($9.067 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、无患子($8.571 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、杨树($8.219 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、竹子($8.186 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、朴树($7.831 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、广玉兰($7.727 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);第三类(日净固碳量中等):深山含笑($7.437 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、乐昌含笑($7.371 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、梅花($7.231 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、桂花($7.222 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、榆树($7.163 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、珊瑚树($7.058 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、腊梅($7.049 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、女贞($6.804 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);第四类(固碳量偏下):七叶树($6.273 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、木槿($6.257 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、三角枫($6.143 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、悬铃木($5.786 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、红叶石楠($5.761 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、枇杷($5.638 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、银杏($5.614 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);第五类(固碳量低):洒金珊瑚($5.031 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、榉树($4.930 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、马褂木($4.736 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、樱花($4.567 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、二乔木兰($4.369 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、梧桐($4.146 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、紫叶李($3.888 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

其中第一类和第二类树种日净固碳量相差不大,都很高,处于较高水平;第三类和第四类相较于第一类和第二类固碳量相差较大,处于中等水平;第五类相较于第三类和第四类又有较大差距,处于较低水平.因此,在进行公路碳汇林建设时,建议以第一类和第二类树种为主,第三类和第四类树种辅之,最好不要采用第五类树种.但是特殊情况除外,如在公路碳汇林中央分隔带的布置时,需以满足行车视距为主要因素,再考虑树种的碳汇能力.

3.2 树种光响应拟合参数分析

3.2.1 拟合参数生理特性分析 树种的光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)、光饱和时净光合速率(A_{max})、表观量子效率(Q)及暗呼吸速率(Rd)这 5 个参数是描述植物光合作用特征的重要生理生态参数^[20].用 1.4 中对光响应数据的处理方法,得到 5 个光合特征指标的结果,利用 SPSS19.0 分析得出 30 个树种的生理指标参数及其差异性分析结果,得出 30 个树种的生理指标参数及差异性分析,见表 3.

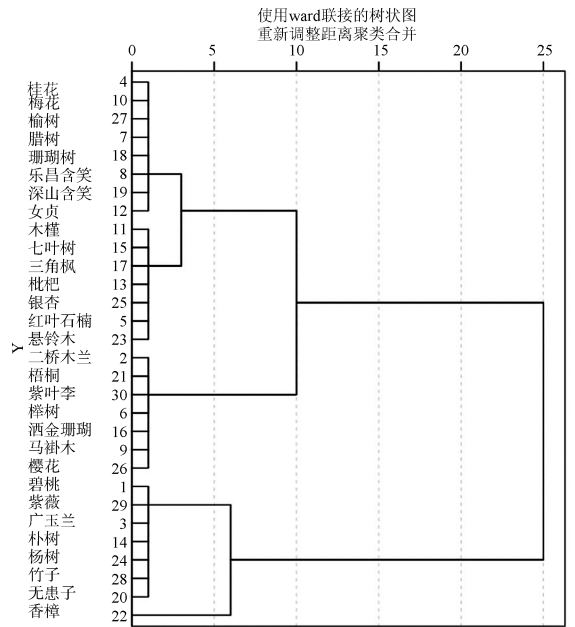


图 1 30 个树种日净固碳量聚类分析结果
Fig. 1 Cluster analysis on diurnal net carbon fixation of thirty tree species

(1) 光饱和点和光补偿点

由表 3 可知,广玉兰的光饱和点最大($1449.410 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),光补偿点较高($33.420 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),但总体光强利用范围最大,在光照充足的条件下,广玉兰会吸收更多的二氧化碳.银杏的光饱和点最低($1065.961 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),光补偿点较高($45.700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),总体光强利用范围最小,说明银杏光合能力弱.在树种光饱和点显著性差异分析上,广玉兰和银杏有着明显的差异性.乐昌含笑、深山含笑、紫叶李、二乔木兰、樱花和梧桐之间无显著性差异,但与其他树种有着明显的差异性.在光补偿点的显著性差异分析上,乐昌含笑和竹子有着明显的差异性.银杏、木槿、无患子、榉树和樱花之间无显著性差异,但与其他树种有着明显的差异性.

(2) 最大净光合速率和暗呼吸速率

由表 3 可知,碧桃的最大净光合速率最大,为 $16.204 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其次为香樟、紫薇、红叶石楠等,说明其对光能利用潜力大;而七叶树对光能的利用潜能最小,为 $3.283 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.由表 3 可知,在树种最大净光合速率的显著差异分析上,碧桃和七叶树有着明显的差异.朴树、榆树、红叶石楠、梅花、银杏、杨树和广玉兰组间差异性不明显,但与其他树种差异性显著.

暗呼吸速率高低说明植物在无光照条件下的呼吸速率以及有机物消耗的强弱不同.由表 3 可

知,深山含笑暗呼吸速率最小,为 $0.451 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表示其在夜间消耗的有机物最少;银杏的暗呼吸速率最大,为 $2.603 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表示其在夜间消耗的有机物最多.由表 3 可知,在树种暗呼吸速率的显著性差异分析上,深山含笑和银杏的差异性显著.枇杷、红叶石楠、女贞、二乔木兰和香樟组间无差异性,但与其他树种差异性明显.本试验中不同树种的暗呼吸速率存在差异,这与植物种类、发育时期和生理状态有关.

(3) 表观量子效率

由表 3 可知,洒金珊瑚的表观量子效率最高,为 0.076,说明洒金珊瑚利用弱光的能力最强,利用光能的效率高;广玉兰的表观量子效率最低,为 0.026,说明广玉兰利用弱光的能力最弱,利用光能

的效率低,建议以后栽种广玉兰时,应选择光照充足的土地.由表 3 可知,在树种表观量子效率的显著性差异分析上,洒金珊瑚和广玉兰之间存在着显著的差异.碧桃、红叶石楠、桂花、女贞、竹子、马褂木和香樟组间差异性不明显,但与其他树种差异性显著.植物的 Q 越大表明其利用弱光的能力越强,吸收与转换光能的色素蛋白复合体可能越多^[21].长势良好的植物的 Q 的范围一般为 $0.04 \sim 0.07$,且在实验室适宜条件下,理论上量子效率不会大于 0.125 ^[22],本文中试验的所有树种表观光量子符合理论结果,但广玉兰、乐昌含笑、深山含笑、樱花、紫叶李值偏小,显著低于其他树种,这与树种在苏南地区受到的环境胁迫有关,如光照、温度、辐射、酸雨等,而其他树种对苏南地区的环境较适应.

表 3 树种光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)、最大净光合速率(A_{\max})、表观量子效率(Q)、暗呼吸速率(R_d)特征值

Tab. 3 Light saturation point (LSP), light compensation point (LCP), maximum net photosynthetic rate (A_{\max}), apparent quantum yield (Q) and dark respiration rate (R_d) of tree species

序号	树种	光饱和点 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光补偿点 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大净光合速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	表观量子效率	暗呼吸特征值 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	榉树	1299.452±52.394bcd	37.767±14.908ab	5.999±0.377jk	0.040±0.007g	1.303±0.391c
2	朴树	1088.626±82.701kl	19.970±4.692gh	10.519±0.541f	0.071±0.009ab	1.257±0.150cde
3	榆树	1268.295±79.103cde	28.100±10.555cd	10.053±0.461f	0.049±0.008ef	1.235±0.498cd
4	紫叶李	1398.533±16.374ab	31.080±3.698bc	5.132±0.235kl	0.031±0.002i	0.935±0.109fg
5	碧桃	1190.532±51.288gh	21.113±6.068fg	16.204±0.516a	0.058±0.007bcd	1.206±0.467cd
6	枇杷	1238.020±22.166def	17.047±2.912hi	4.293±0.385l	0.051±0.003ef	0.721±0.140ghi
7	樱花	1351.701±13.938ab	36.960±14.309a	6.695±0.548ij	0.032±0.002i	1.156±0.480efg
8	红叶石楠	1228.437±57.545ef	14.767±3.400jk	11.793±0.861de	0.056±0.002cd	0.777±0.184fg
9	梅花	1118.147±29.065jkl	25.157±3.971ef	11.756±0.222de	0.069±0.003abc	1.650±0.187bcd
10	桂花	1200.355±21.225fg	21.993±1.171fgh	8.217±0.699gh	0.055±0.007cde	1.058±0.140hi
11	女贞	1252.255±103.234ef	14.793±3.982jkl	8.632±0.870g	0.050±0.011efg	0.716±0.290hi
12	无患子	1159.480±49.148hij	38.060±5.446abc	13.119±0.120c	0.062±0.004ab	2.224±0.303ab
13	银杏	1065.961±36.829l	45.700±0.772a	10.269±0.693f	0.074±0.004ab	2.603±0.079a
14	洒金珊瑚	1068.764±127.331l	31.290±2.853bcd	7.476±0.214hi	0.076±0.017a	1.787±0.265bc
15	竹子	1216.222±79.788fgh	9.197±3.611l	8.615±0.158g	0.056±0.010cde	0.498±0.264hi
16	二乔木兰	1342.894±49.533cd	25.750±2.813def	6.671±0.196ij	0.037±0.004hi	0.836±0.148gh
17	深山含笑	1381.723±43.865abc	15.947±7.891ij	4.574±0.618l	0.029±0.005i	0.451±0.240i
18	乐昌含笑	1430.372±8.311ab	47.117±1.243a	7.705±0.474ghi	0.028±0.004i	1.219±0.182fg
19	马褂木	1179.257±98.137hij	17.610±7.559hij	8.050±0.579gh	0.058±0.011bcd	0.931±0.527fg
20	广玉兰	1449.410±87.942a	33.420±6.796bcd	12.058±0.589d	0.026±0.009i	0.869±0.409ghi
21	珊瑚树	1208.058±29.540g	18.203±7.781ij	8.440±0.832gh	0.058±0.007cd	0.922±0.251fgh
22	悬铃木	1226.728±111.276hi	23.347±5.530hi	6.398±0.866j	0.050±0.014fgh	1.003±0.453efg
23	紫薇	1140.582±100.571ijk	22.383±4.160hi	14.281±0.825b	0.062±0.010de	1.385±0.469c
24	杨树	1298.142±36.552bc	26.647±9.871def	11.775±1.063de	0.041±0.003ghi	1.058±0.332def
25	梧桐	1328.010±54.637abc	31.853±6.819def	6.379±0.133j	0.037±0.005hi	1.039±0.115def
26	腊梅	1129.411±74.168jkl	29.190±4.436fgh	10.941±0.195ef	0.066±0.009de	1.643±0.369bed
27	七叶树	1287.556±150.296fgh	42.030±2.719ab	3.283±0.381m	0.042±0.022fg	1.119±0.401de
28	三角枫	1301.882±157.196ef	29.403±4.35cde	7.651±0.774ghi	0.042±0.020hi	1.089±0.592def
29	香樟	1216.263±23.648ghi	13.040±3.779kl	15.737±1.045a	0.053±0.006fgh	0.658±0.193ghi
30	木槿	1254.557±26.296de	39.477±2.526abc	10.389±0.063f	0.051±0.003fgh	1.773±0.177bc

同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

3.2.2 树种生理拟合参数综合分析 上述 5 种光合特征指标仅从某一角度分析了树种在苏南地区生长的适应性,对树种的自身生理优劣性不能进行系统评价,为此进行因子分析,提取主因子,计算主因子综合得分,再按主因子综合得分进行聚类分析,从而对树种生长适应性进行等级划分。

(1) 公共因子提取

本文用 SPSS 19.0 对树种 5 个光合特征指标拟合参数进行因子分析,并分析旋转后的因子载荷矩阵。表 4 为总方差解释表,初始特征值列中合计列因子变量的特征值,反映因子的重要程度。方差百分比这一列表示因子变量的贡献率。提取 1、2、3 个公共

因子时特征值曲线斜率较大变化明显,提取以下因子时特征值曲线斜率变小,趋于平缓,所以提取了 3 个公共因子,累计方差高达 97.457%,反映了原有因子变量绝大部分的信息。表 5 为旋转后的因子载荷矩阵。表观量子效率(Q)及光饱和点(LSP)这两个变量都与第 1 个公因子有关,且相关系数的绝对值分别为 0.945 和 0.970,反映了植物利用强、弱光能力;暗呼吸速率(Rd)及光补偿点(LSP)都与第 2 个公因子相关,且相关系数分别为 0.827 和 0.977,反映了植物消耗有机物的快慢;最大光合速率(A_{max})与第 3 个公因子密切相关,相关系数为 0.980,反映了植物对光能利用潜力的大小。

表 4 总方差解释表

Tab.4 Total analysis of variance

主成分	初始特征值			旋转载荷贡献		
	λ	方差的贡献率(%)	累积贡献率(%)	合计	方差的贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	2.576	51.526	51.526	2.149	42.988	42.988
2	1.506	30.127	81.653	1.641	32.823	75.811
3	.790	15.804	97.457	1.082	21.645	97.457

表 5 旋转后的因子载荷矩阵

Tab.5 Rotated Component Matrix

因素	主成分		
	1	2	3
A _{max}	.192	.022	.980
Rd	.501	.827	.214
Q	.945	.037	.248
LCP	-.163	.977	-.086
LSP	-.970	-.040	-.088

(2) 公因子聚类分析

用 SPSS19.0 求得这 30 个树种的自身属性体现优劣的综合得分,并对综合得分进行 Ward 法系统聚类分析,结果见图 2。根据图 2 及 30 个树种的综合得分值,可分为 5 类,依次为:第一类:银杏、洒金珊瑚、无患子;第二类:梅花、腊梅、朴树、紫薇、木槿、香樟、碧桃;第三类:马褂木、桂花、竹子、榆树、珊瑚树;第四类:榉树、红叶石楠、悬铃木、七叶树、杨树、三角枫、紫叶李、女贞、枇杷、樱花、梧桐;第五类:二乔木兰、乐昌含笑、广玉兰、深山含笑。

其中,第一类树种无患子、洒金珊瑚、银杏在苏南地区的生长适应性最好,处于较高水平;其次是第二类香樟、木槿、碧桃、梅花、腊梅、朴树和紫薇生长适应性相较于第一类略差,处于中上水平;第三类和第四类树种生长适应性一般,相较于第一类相差较大,处于中等水平;第五类树种二乔木兰、乐昌含笑、广玉兰、深山含笑生长适应性较差,处于较低

水平。在苏南地区进行公路碳汇林建设时,建议优先选取生长适应能力处于中等偏上及中等的树种。

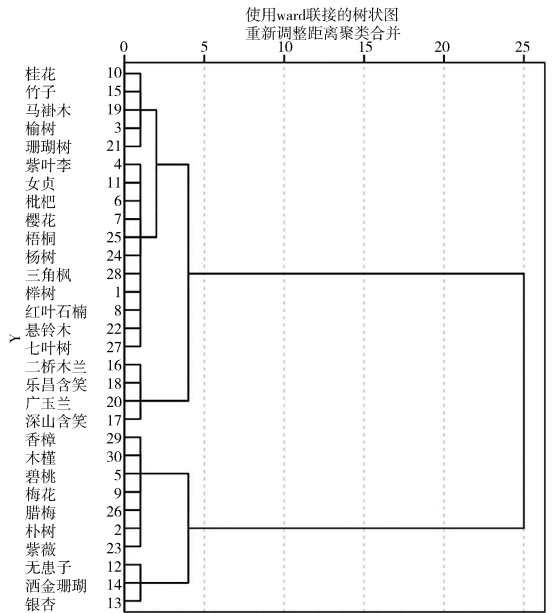


图 2 30 个树种生理参数聚类分析结果

Fig.2 Cluster analysis on physiological parameters of thirty tree species

4 结 论

综上所述,本文通过对苏南地区 30 种常见绿化树种的光合特性测定,对树种的固碳量大小、光合生理指标以及各指标综合评价等方面进行了研究,筛选出了 10 种固碳能力高且生存能力强的树

种,为提高苏南地区公路碳汇绿化和碳汇质量提供了科学依据,对公路绿化设计及建设公路碳汇林具有重要的参考价值.公路碳汇林的提出增强了绿化带的固碳和生态效能,缓解了交通环境的污染情况.因为建设公路碳汇林主要目的是减少公路运输排放的二氧化碳,所以本文对树种固碳量这一方面着重考虑,而树种生长适应性次之.具体结论如下:

(1)根据 30 种树种日净固碳量的聚类分析结果及日净固碳量的高低将其分成了五类,其中第一、二、三类的树种日净固碳量较高,主要有香樟、碧桃、紫薇、无患子等等.

(2)对 30 种树种的生理指标参数的综合得分进行了聚类分析,根据综合得分的高低又将树种分成了五类,其中前三类树种生理指标综合得分较高,主要有无患子、洒金珊瑚、银杏、香樟等等.

(3)进行综合分析后,筛选出 10 种固碳量高且生长适应性较强的树种.这 10 种树种分别为香樟、碧桃、紫薇、朴树、无患子、竹子、桂花、榆树、梅花、腊梅.苏南地区公路碳汇林建设时在满足交通要求的前提下,可以优先选用这 10 种树种.

由于植物的光合作用受外界多变的环境因素的影响,本研究选择一个季节中一段时间内对植物进行光合生理参数研究,在今后的研究中将进一步应用多种分析方法综合分析这些相互联系、相互制约的影响因素,还需要持续观察树种生产力的变化.

参考文献:

[1] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production [J]. *BioScience*, 1981, 31: 29.

[2] Waring R H, Schlesinger W H. *Forest ecosystems: concepts and management* [M]. Inc Orlando, F L, USA: Academic Press, 1985: 313.

[3] Susan T. Carbon respired by terrestrial ecosystems: recent progress and challenges [J]. *Global Change Biol*, 2006, 12: 141.

[4] Yang J, McBride J R, Zhou J X. The Urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction [J]. *Urb Forestry Urb Greening*, 2005, 3: 65.

[5] Wu J B, Guan D X, Sun X M, *et al*. Photosynthetic characteristics of dominant tree species and canopy in the broadleaved Korean pine forest of Changbai

Mountains [J]. *Sci in China Series D: Earth Sci*, 2006, 49: S2-89.

[6] Peek M S, Russek-Cohen E, Wait A D, *et al*. Physiological response curve analysis using nonlinear mixed models [J]. *Oecologia*, 2002, 132: 175.

[7] 张中峰, 黄玉清, 莫凌, 等. 岩溶区 4 种石山植物光合作用的光响应 [J]. *西北林学院学报*, 2009, 24: 44.

[8] 王冉, 何茜, 李吉跃, 等. 中国 12 种珍稀树种光合生理特性 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38: 15.

[9] 魏玲, 冉江洪, 钟雪, 等. 公路对九寨沟县华西箭竹生长状况的影响 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2017, 54: 429.

[10] 张娇, 施拥军, 朱月清, 等. 浙北地区常见绿化树种光合固碳特征 [J]. *生态学报*, 2013, 33: 1740.

[11] 王丽勉, 胡永红, 秦俊, 等. 上海地区 151 种绿化植物固碳释氧能力的研究 [J]. *华中农业大学学报*, 2007, 26: 399.

[12] 陆贵巧, 尹兆芳, 谷建才, 等. 大连市主要行道树绿化树种固碳释氧功能研究 [J]. *河北农业大学学报*, 2006, 29: 49.

[13] 王忠君. 福州植物园绿量与固碳释氧效益研究 [J]. *中国园林*, 2010, 26: 1.

[14] 周海燕, 孙志, 高凡丁, 等. 基于碳汇理论下高速公路绿化景观设计—以贵州余庆至凯里高速公路为例 [J]. *中外公路*, 2015, 35: 20.

[15] 李梦, 施拥军, 周国模, 等. 浙江省嘉兴市高速公路造林碳汇计量 [J]. *浙江农林大学学报*, 2014, 31: 329.

[16] 焦双健, 侯程程. 中国华北公路植物碳汇研究 [J]. *环境污染与保护*, 2012, 1: 7.

[17] 李超男. 城市道路交通碳排放及路域植被碳汇分析 [D]. 南京: 南京林业大学, 2016.

[18] 刘嘉君, 王志刚, 阎爱华, 等. 12 种彩叶树种光合特性及固碳释氧功能 [J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39: 23.

[19] 吴统贵, 虞木奎, 孙海菁, 等. 林药复合系统林下植物光合特性对生长光强的响应 [J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19: 338.

[20] 潘瑞炽, 王小菁, 李娘辉. *植物生理学* [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 87.

[21] Gregoriou K, Pontikis K, Vemmos S. Effects of reduced irradiance on leaf morphology, photosynthetic capacity, and fruit yield in olive (*Olea Europaea* L.) [J]. *Photosynthetica*, 2007, 45: 172.

[22] Long S P, Humphries S, Falkowski P G. Photo-Inhibition of photosynthesis in nature [J]. *Ann Rev Plant Physiol Plant Molecul Biol*, 1994, 45: 633.

引用本文格式:

中文: 万丽娟, 张毅, 程东祥, 等. 苏南地区常见公路绿化树种光合固碳特征研究 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2018, 55: 881.

英文: Wan L J, Zhang Y, Cheng D X, *et al*. The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species for highway greening in southern Jiangsu [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2018, 55: 881.