

上海地区主要绿化树种夏季光合特性和固碳释氧能力研究

邵永昌^{1,2}, 庄家尧^{1,2*}, 王柏昌³, 张金池^{1,2}, 李娟娟⁴, 李二焕^{1,2}

(1. 南京林业大学水土保持与生态修复实验室, 南京 210037; 2. 江苏省南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 3. 国家林业局华东林业调查规划设计院, 杭州 310019; 4. 迪士尼中国研究, 上海 200021)

摘要: 为了探究城市典型绿化树种夏季光合特性及其固碳释氧能力, 选取了上海地区 17 个常用城市绿化树种, 使用 LI-6400 光合仪测定植物光合特性, 分析光合作用主要影响因子的相关性, 并对常用绿化树种的日固碳释氧能力进行定量计算和聚类分析。结果表明: (1) 在 17 个树种中, 无患子、香樟、冬青和白玉兰日均净光合速率较高, 广玉兰、蚊母树和深山含笑较低; 所有树种净光合速率日变化都表现为早晚低、午间前后高的特点; 除冬青、深山含笑外, 其他树种净光合速率日变化为双峰曲线, 存在较明显的“光合午休”现象; (2) 除白玉兰外, 其他树种净光合速率与蒸腾速率、气孔导度、太阳辐射和气温呈正相关; (3) 冬青、香樟单位土地面积日固碳释氧能力较高, 深山含笑、蚊母树、栾树及广玉兰的单位土地面积日固碳释氧能力较低。在城市绿化树种选择过程中, 当考虑植物固碳释氧能力时, 应选择无患子、冬青、香樟、白玉兰、鹅掌楸、重阳木、三角枫和银杏等固碳释氧能力较强的树种, 而适量配置深山含笑、蚊母树、栾树和广玉兰等固碳释氧能力较弱的树种。

关键词: 绿化树种; 净光合速率; 光合特性; 固碳释氧

中图分类号: S731.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2016)01-0094-08

Photosynthetic characteristics and carbon sequestration and oxygen release capacity of the main urban landscape tree species during summer in Shanghai

SHAO Yongchang^{1,2}, ZHUANG Jiayao^{1,2}, WANG Baichang³, ZHANG Jinchi^{1,2}, LI Juanjuan⁴, LI Erhuan^{1,2}

(1. Soil and Water Conservation and Ecological Restoration Laboratory of Nanjing Forestry University, Nanjing 210037;

2. Collaborative Innovation Center of Sustainable China of Jiangsu Province of Nanjing Forestry University, Nanjing 210037;

3. East China Forestry Planning and Designing Institute, Hangzhou 310019; 4. Disney Research CHINA, Shanghai 200021)

Abstract: In order to explore the photosynthetic characteristics and carbon sequestration and oxygen release capacity of tree species in summer, seventeen main landscape tree species in Shanghai were selected to measure the photosynthesis using LI-6400 photosynthetic apparatus. The correlation between photosynthesis and the main factors was analyzed. The capacity of carbon sequestration and oxygen capacity was estimated quantitatively by clustering analysis. The results showed that: (1) In the seventeen tree species, *Sapindus mukorossi* Gaertn, *Cinnamomum camphora*, *Ilex chinensis* Sims, *Magnolia alba* DC had a high mean daily net photosynthetic rate, while *Magnolia grandiflora*, *Distylium racemosum* Sieb. et Zucc, *Michelia maudiae* Dunn had a low mean daily net photosynthetic rate. The daily variation of the net photosynthetic rate showed a low value in the morning and evening, but a high value around noon, presenting bimodal distribution as a whole with the obvious "midday depression" phenomenon except for *Ilex chinensis* Sims and *Magnolia alba* DC; (2) Except *Magnolia alba* DC, the net photosynthetic rates of the other tree species had a positive correlation with the transpiration rate, stomatal conductance, solar radiation, and temperature etc; (3) In terms of the capacity of daily carbon sequestration and oxygen release per unit land, *Ilex chi-*

收稿日期: 2015-07-13

基金项目: 江苏省高等学校林学优势学科建设项目(164010641)和江苏省研究生科研创新工程 (KYLX_0904) 共同资助。

作者简介: 邵永昌, 硕士研究生。E-mail: 604460894@qq.com

* 通信作者: 庄家尧, 博士, 副教授。E-mail: nlzjiayao@njfu.edu.cn

nensis Sims and *Cinnamomum camphora* were the highest, while those of *Micheliamaudiae* Dunn, *Distylium racemosum* Sieb. et Zucc, *Koelreuteria paniculata* Laxm, *Magnolia grandiflora* were relatively lower. Considering the capacity of carbon fixation and oxygen release, *Ilex chinensis* Sims, *Cinnamomum camphora*, *Sapindus mukorossi* Gaertn, *Magnolia alba* DC, *Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg, *Bischofiapolycarpa* (Levl.) Airy Shaw, *Acer buergerianum* Miq, *Ginkgo biloba* L will perform better than the trees, such as *Micheliamaudiae* Dunn, *Distylium racemosum* Sieb. et Zucc, *Koelreuteria paniculata* Laxm, *Magnolia grandiflora*. The result of the research will be a good reference for selecting tree species used in urban areas in Shanghai.

Key words: greening tree species; net photosynthetic rate; photosynthetic characteristics; carbon sequestration and oxygen release

随着全球气候变暖和城市化进程加速, 城市下垫面和城区森林植被结构发生了剧烈的变化^[1], 城市热岛效应成为了人们关注的焦点^[2]。城市森林通过吸收太阳能、进行蒸腾作用发挥降温增湿效益并通过光合作用吸收二氧化碳释放出氧气, 从而影响大气环境的湿热属性, 对缓解城市热岛效应有着显著作用^[3], 因此增加城市绿地面积和植被覆盖度、优化城市植被空间布局被认为是缓解城市热岛效应和应对全球气候变暖的重要策略^[4]。城市植被作为城市结构中的自然生产力主体, 其光合作用及其固碳释氧效应目前受到了广泛的关注^[5]。

国外早期对树木光合作用的研究主要针对各种环境因子与光合作用之间的关系, 试验材料为离体或盆栽, 之后 Kramer 等^[6]对影响树木光合作用的环境因子进行了综合分析, 介绍了早期树木光合生态学研究的概况。20 世纪 90 年代以来, 大气 CO₂ 浓度升高对树木光合生理的影响成为了许多学者们对植物光合生理生态研究的热点, 许大全简要评述了树木光合作用对二氧化碳浓度升高的响应以及影响这种响应的因素和光合适应的可能机理^[7]; 针对国外近几十年在二氧化碳浓度升高对植物的直接影响方面的研究, 蒋高明等介绍了相关的生理生态学研究方法、动态、基本理论和存在问题等^[8]; 城市植物光合生理研究中常应用园林绿化植物包括金叶假连翘、花叶鹅掌藤、金边决明、狗牙花、北美枫香、罗芙木等^[9-11]。

国外对植物固碳释氧方面的研究始于 20 世纪 60 年代, 通过应用树木生物量回归方程对植物固碳释氧效益进行探索, 20 世纪 90 年代 Rowntree^[12]采用该方法对城市园林绿地碳储量进行了评估。国内学者在植物固碳释氧方面的研究起步较晚, 自 20

世纪 90 年代以来, 学者们尝试采用不同的方法对植物固碳释氧作用进行探索。陈自新^[13]使用植物光合测定仪计算了北京地区部分植物的年固碳释氧量; 管东生^[14]利用林木生物量回归方程估算了城市绿地的固碳释氧能力; 近年来, 基于高清晰分辨率的遥感影像和 GIS 技术的城市绿地定量评价模型在城市生态研究领域得到了广泛应用。目前, 城市绿化树种对外界环境改变的响应机制以及如何实现由叶片光合到整株植物的尺度转变是城市绿化树种光合生理生态研究中亟待解决的问题^[15]。

近年来, 国内外许多学者们对城市植物的研究主要集中在植物群落的配置方面, 对生态功能量化的研究还很少^[16-19]。本研究拟从不同树种光合特性和固碳释氧能力的角度出发, 对上海地区 17 个常用绿化树种的净光合速率日变化及其影响因子、固碳释氧能力进行分析比较, 并对不同树种固碳释氧能力进行了分级, 定量化探究城市常见绿化树种的光合特性和固碳释氧能力, 为城市森林和城市绿化的树种选择、植被群落的时空配置和改造提供科学理论依据^[20]。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究试验地位于上海市浦东新区川沙镇苗圃基地 (121°39'E, 31°08'N), 地属北亚热带季风性气候, 四季分明, 日照充分, 雨量充沛, 气候温和湿润, 春秋较短, 冬夏较长; 2013 年, 全市平均气温 17.6℃, 日照 1885.9 h, 降水量 1173.4 mm; 全年 60% 以上的雨量集中在 5 月至 9 月的汛期; 试验地土壤类型为潜育水稻土。

表 1 2013 年气温和降水量分配状况

Table 1 The distribution of temperature and precipitation in 2013

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
气温/℃ Temperature	4.2	6.9	9.4	14.9	20.6	24.4	27.9	27.1	24.4	17.6	12.2	7.3

降水量/mm Precipitation 42 64 90 112 117 153 138 119 141 102 88 71

1.2 试验材料

在对上海市现有的植物种类和生长状况进行调研分析的基础上,根据树种在城市绿化配置中出现的频率和重要性等综合指标,选择具有代表性的17个常用城市绿化植物树种作为研究对象。测定树木均为12~15年生大苗,生长状况良好、无病虫害,

无草本和地被层,其中,栎树、白玉兰、无患子、榉树、鹅掌楸、银杏、悬铃木、三角枫、重阳木、香樟、广玉兰和杜英行间距为5.0 m×5.0 m,冬青、石楠、深山含笑、桂花、蚊母树行间距为3.0 m×3.0 m。基本情况见表2。

表2 测试树种基本信息

Table 2 Basic information of the measured tree species

种名 Species	科名 Family	属名 Genus	植物类型 Plant type	胸径/cm Diameter at breast height	冠幅/m The crown	树高/m Tree height
栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm	无患子科	栎树属	落叶乔木	12.9	5.9×6.3	6.4
白玉兰 <i>Magnolia alba</i> DC.	木兰科	木兰属	落叶乔木	9.4	2.5×2.4	4.4
无患子 <i>Sapindus mukorossi</i> Gaertn	无患子科	无患子属	落叶乔木	14.3	5.4×6.1	6.5
榉树 <i>Zelkova schneideriana</i> Hand-Mazz	榆科	榉树属	落叶乔木	13.1	5.8×6.1	4.5
鹅掌楸 <i>Liriodendron chinense</i> (Hemsl.) Sarg	木兰科	鹅掌楸属	落叶乔木	15.9	6.8×6.3	5.9
银杏 <i>Ginkgo biloba</i> L	银杏科	银杏属	落叶乔木	18.3	4.8×5.7	4.6
悬铃木 <i>Platanus</i> Linn	悬铃木科	悬铃木属	落叶乔木	22.8	6.4×6.1	7.6
三角枫 <i>Acer buergerianum</i> Miq.	槭树科	槭树属	落叶乔木	17.8	7.1×7.2	6.6
重阳木 <i>Bischofiapolycarpa</i> (Levl.) Airy Shaw	大戟科	秋枫属	落叶乔木	9.9	4.7×5.4	5.5
冬青 <i>Ilex chinensis</i> Sims	冬青科	冬青属	常绿乔木	8.8	3.7×4.4	4.3
石楠 <i>Photiniaserrulata</i> Lindl.	蔷薇科	苹果属	常绿乔木	7.8	2.0×2.3	2.2
桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	木犀科	木犀属	常绿乔木	9.1	2.5×2.7	3.3
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	樟科	樟属	常绿乔木	18.8	5.6×4.2	6.4
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	木兰科	木兰属	常绿乔木	15.7	4.8×5.3	5.9
深山含笑 <i>Micheliamaudiae</i> Dunn	木兰科	含笑属	常绿乔木	7.9	2.2×2.5	3.5
杜英 <i>Elaeocarpusdecipiens</i> Hemsl.	杜英科	杜英属	常绿乔木	23.7	5.6×6.2	5.6
蚊母树 <i>Distylium racemosum</i> Sieb. et Zucc.	金缕梅科	蚊母树属	常绿灌木	--	1.3×1.3	1.7

1.3 研究方法

1.3.1 测定方法 采用LI-6400XT便携式光合测定仪2台,在自然光照下在室外进行活体测定。取样时选择生长状况良好、无病虫害的健康成林植株,对选取的树木中部冠层阳面中高部位树枝前端第3~5片成熟功能叶片在标准叶室进行测试取值。从5:30-19:30每2 h同步测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、叶片温度(T_l)、大气 CO_2 浓度(C_a)、光合有效辐射(PAR)、气温(T_a)、相对湿度(RH)等参数,在2013年7月18日-20日(晴天)连续监测3 d,每个树种重复测定3株并取平均值。

1.3.2 叶面积指数的测定 在本试验样地选取树龄相同、冠型均匀、枝叶茂盛等有代表性的试验树种各5株,运用LAI-2200冠层分析仪,用60度镜头在植物6个不同方向各取一组观测值,仪器自动计

算出叶面积指数,每个树种做3次测试后取平均值。

1.3.3 固碳释氧的计算 用积分法求得植物叶片在1日内的净同化量,植物在测定日的净同化量计算公式为^[21]:

$$P = \sum_{i=1}^n [P_{i+t} + P_i] \div 2 \times (t_{i+t} - t_i) \times 3600 \div 1000$$

式中, P 为测定日同化总量($mmol m^{-2} s^{-1}$), P_i 为初测点瞬时光合作用速率; P_{i+t} 为下一测点的瞬时光合作用速率($\mu mol m^{-2} s^{-1}$), t_i 为初测点的瞬时时间(h), t_{i+t} 为下一测点时间(h), n 为测试次数。3600是指每小时3600 s,1000为1 mol=1000 mmol=1000000 μmol 。

用测定日的同化总量换算为测定日固定 CO_2 和释放 O_2 量分别为:

$$W_{CO_2}/g m^{-2} = P \times 44/1000$$

$$W_{O_2}/g m^{-2} = P \times 32/1000$$

式中,44为 CO_2 的摩尔质量($g mol^{-1}$),32为 O_2 的摩尔质量($g mol^{-1}$), W_{CO_2} 为单位面积叶片每天

固定 CO_2 的质量 ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$), W_{O_2} 为单位面积叶片每天释放出 O_2 的质量 ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)。

单位土地面积上单株植物的日固碳释氧量分别为:

$$Q_{\text{CO}_2}/\text{g m}^{-2}=\text{LAI}\times W_{\text{CO}_2}$$

$$Q_{\text{O}_2}/\text{g m}^{-2}=\text{LAI}\times W_{\text{O}_2}$$

式中, LAI 为单株叶面积指数; Q_{CO_2} 为日固定 CO_2 的量 ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$), Q_{O_2} 为日释放 O_2 的量 ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)。

1.3.4 数据分析 使用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据处理和表格制作, Origin 8.5 绘制图件, 采用 SPSS 19.0 软件进行相关统计与分析。

2 结果与分析

2.1 主要环境因子日变化

观测时间内 (5:30—19:30) 光合有效辐射 (PAR) 呈单峰曲线变化, 13:30 左右达到最大值 (1790

$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 随后逐渐减弱; 经过夜间植物呼吸作用的富集, 大气 CO_2 浓度 (C_a) 在早晨 (5:30) 表现为最高值 ($366 \mu\text{mol mol}^{-1}$), 在 15:30 左右形成一个低谷 ($349 \mu\text{mol mol}^{-1}$), 此后有所回升, 呈先下降后上升的趋势, 与 PAR 日变化规律相反, 却有滞后 (图 1A); 随着 PAR 的逐渐增大, 气温 (T_a) 亦逐步升高, 呈单峰型曲线, 在 11:30-15:30 空气温度较高, 最高温度出现在 13:30 (34.85°C), 相对于 PAR 变化有所滞后, 日变化幅度较大, 温差达 7°C ; 空气相对湿度 (RH) 日变化与气温相反, 呈“U”型曲线变化, 早上 5:30 时 RH 最高 (70.45%), 随着 PAR 和 T_a 的升高, RH 逐渐降低, 在 13:30 达到全天最低值 (51.95%), 之后开始回升 (图 1B); RH 与 PAR、 T_a 分别呈显著 ($P<0.05$)、极显著 ($P<0.01$) 的负相关。

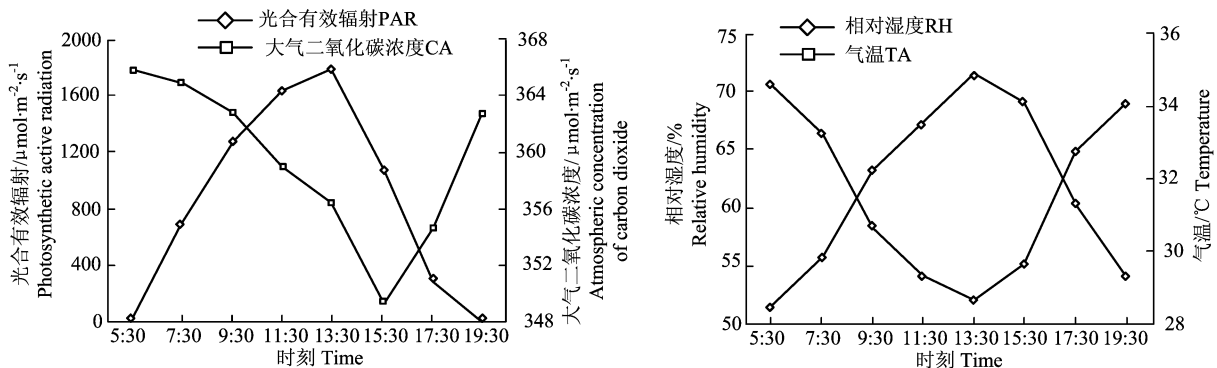


图 1 主要环境因子日变化

Figure 1 Diurnal changes of the main environmental factors

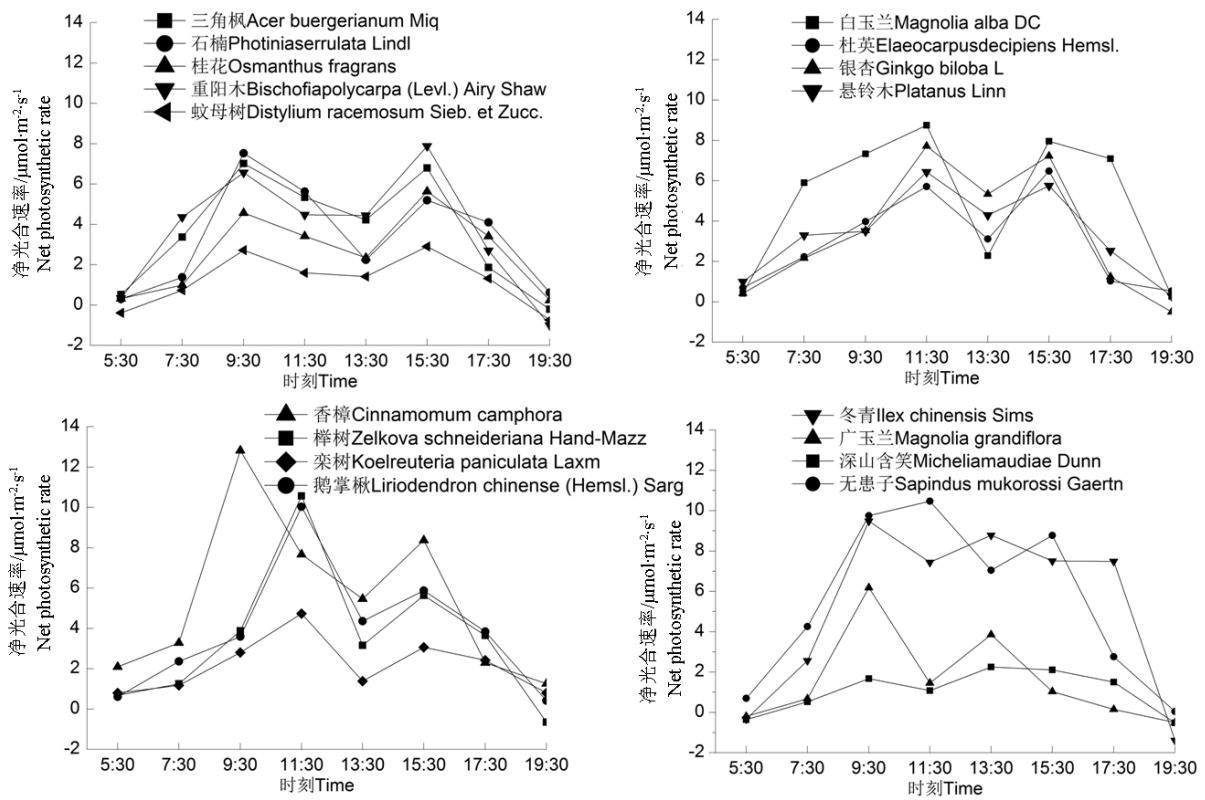


图 2 净光合速率日变化

Figure 2 Diurnal changes of net photosynthetic rates

表 3 不同树种净光合速率与影响因子相关性

Table 3 Correlation analysis on photosynthetic rate of different tree species

植物类型 Plant type	树种 Tree species	气孔 导度 G_s	胞间 CO_2 浓度 C_i	蒸腾 速率 Tr	水汽 压差 $VPDL$	叶片 温度 T_l	光合有 效辐射 PAR	相对 湿度 RH	气温 T_a	大气 CO_2 浓度 C_a
落叶乔木 Deciduous trees	白玉兰	0.148	-0.882*	0.118	0.014	-0.073	-0.288	0.113	-0.137	-0.070
	栎树	0.050	-0.855*	0.299	0.267	0.291	0.473	-0.662	0.635	-0.680
	无患子	0.964**	-0.245	0.922**	0.475	0.674	0.774	-0.743	0.611	-0.196
	榉树	0.809	-0.479	0.782	-0.08	0.485	0.283	-0.421	0.355	-0.248
	鹅掌楸	0.945**	-0.594	0.972**	0.364	0.422	0.516	-0.618	0.551	-0.356
	银杏	0.953**	-0.574	0.974**	0.531	0.642	0.748	-0.818*	0.750	-0.572
	悬铃木	0.956**	0.607	0.969**	0.351	0.477	0.654	-0.697	0.618	-0.502
	三角枫	0.859*	-0.188	0.735	-0.204	-0.145	0.559	-0.575	0.480	-0.255
常绿乔木 Evergreen trees	重阳木	0.872*	-0.701	0.923**	-0.079	0.148	0.462	-0.434	0.359	-0.309
	深山含笑	0.915*	-0.349	0.906*	0.672	0.499	0.389	-0.732	0.835*	-0.724
	杜英	0.932**	-0.684	0.930**	0.062	0.270	0.578	-0.667	0.593	-0.518
	桂花	0.305	-0.764	0.546	0.009	0.178	0.088	-0.505	0.566	-0.645
	香樟	0.635	-0.670	0.598	-0.375	0.493	0.481	-0.617	0.547	-0.414
	石楠	0.950**	-0.930**	0.817*	0.013	0.192	0.177	-0.392	0.354	-0.126
	广玉兰	0.395	-0.771	0.461	0.260	-0.040	0.453	-0.270	0.182	0.330
	冬青	0.746	-0.886*	0.641	-0.333	-0.055	0.581	-0.165	-0.017	0.242
常绿灌木 Evergreen shrubs	蚊母树	0.916*	-0.862*	.936**	0.540	0.389	0.245	-0.530	0.545	-0.510

注：“***” 在 0.01 水平（双侧）上显著相关。“**” 在 0.05 水平（双侧）上显著相关。

Note: “***” denotes significant correlation at $P=0.01$ probability level, “**” denotes significant correlation at $P=0.05$ probability level.

2.2 净光合速率日变化

净光合速率 (P_n) 反映植物叶片固定二氧化碳能力的大小。由图 2 可知, 三角枫、石楠、桂花、重阳木、蚊母树和香樟的净光合速率日变化表现为明显的双峰曲线, 分别在 9:30 和 15:30 出现净光合速率的峰值; 白玉兰、杜英、银杏、悬铃木、榉树、栾树和鹅掌楸等 P_n 日变化为双峰曲线, 峰值分别出现在 11:30 和 15:30; 冬青、无患子在白天的 P_n 维持在一个较高的水平, 广玉兰、深山含笑的净光合速率整体维持在较低水平, 日变幅较小。不同树种的 P_n 日变化虽然呈现出不同的规律, 但都表现为早晚低、午间前后高的特点。

无患子、香樟、冬青和白玉兰具有较高的日均净光合速率, 依次分别为 5.474、5.406、5.191 及 5.002 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; 广玉兰、蚊母树和深山含笑日均净光合速率较低, 依次分别为 1.581、1.196 和 1.030 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。17 个测试树种的日均 P_n 值从大到小依次为: 无患子、香樟、冬青、白玉兰、鹅掌楸、重阳木、三角枫、银杏、悬铃木、石楠、榉树、杜英、桂花、栾树、广玉兰、蚊母树和深山含笑。

2.3 净光合速率与影响因子相关性分析

如表 3 所示, 除白玉兰的影响因子相关性不明显外, 其他测试树种净光合速率 (P_n) 与蒸腾速率 (Tr)、气孔导度 (G_s)、太阳辐射 (PAR)、气温 (T_a) 等呈正相关, 且大部分测试树种 P_n 与 G_s 、 Tr 呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 的正相关。测试树种净光合速率与胞间 CO_2 浓度、大气 CO_2 浓度、相对湿度均呈负相关, 且部分树种呈现显著 ($P < 0.05$) 负相关, 早晨太阳升起, 随着温度的升高和植物光合作用的进行, 大气 CO_2 浓度、空气相对湿度随之降低。

2.4 固碳释氧能力分析

使用 SPSS 19.0 统计分析软件, 对原始数据进行标准化后, 分别对测试树种单位叶面积和单位土地面积日固碳释氧量进行聚类分析, 得到结果如表

4 所示, 可将上海市常用绿化树种单位叶面积固碳释氧能力分为 3 级, 第 1 级为: 冬青、香樟、白玉兰和无患子, 单位叶面积日固碳和释氧量分别在 12.569~13.757 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 、9.141~10.005 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 之间; 第 2 级为: 榉树、鹅掌楸、银杏、悬铃木、三角枫、重阳木、石楠、桂花和杜英, 单位叶面积日固碳和释氧量分别在 6.538~9.688 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 、4.755~7.046 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 之间; 第 3 级为: 栾树、深山含笑、广玉兰和蚊母树, 单位叶面积日固碳和释氧量分别在 2.750~5.195 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 、2.000~3.778 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 之间; 单位叶面积日固碳释氧量依次为: 无患子 > 冬青 > 香樟 > 白玉兰 > 鹅掌楸 > 重阳木 > 三角枫 > 银杏 > 石楠 > 悬铃木 > 榉树 > 杜英、桂花 > 栾树 > 广玉兰 > 蚊母树 > 深山含笑。

上海市常用绿化树种单位土地面积固碳释氧能力分为 4 级, 第 1 级为: 冬青, 固碳释氧能力最好, 单位土地面积日固碳和释氧量值分别为 93.739 和 68.174 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$; 第 2 级为: 香樟, 其单位土地面积日固碳和释氧量分别为 54.396 和 3.9560 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$; 第 3 级为: 无患子、白玉兰、石楠、银杏、悬铃木、鹅掌楸、重阳木、桂花、杜英、榉树和三角枫, 固碳释氧能力较好, 单位土地面积日固碳和释氧量分别在 20.338~38.461 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 、14.791~27.972 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 之间; 第 4 级为: 深山含笑、蚊母树、栾树和广玉兰, 固碳释氧能力最弱, 单位土地面积日固碳和释氧量分别在 5.748~14.701 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 、4.180~10.692 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 之间; 单位土地面积日固碳释氧量依次为: 冬青 > 香樟 > 鹅掌楸 > 白玉兰 > 无患子 > 悬铃木 > 重阳木 > 三角枫 > 石楠 > 银杏 > 榉树 > 桂花 > 杜英 > 栾树 > 蚊母树 > 广玉兰 > 深山含笑。

表 4 不同树种日固碳释氧能力

Table 4 Daily carbon sequestration and release oxygen capacity of different tree species

植物类型 Plant type	树种 Species	I	II	III	IV	V	VI	VII
落叶乔木 Deciduous trees	栾树	118.060	5.195	3.778	3	14.701	10.692	3
	白玉兰	285.651	12.569	9.141	1	34.438	25.046	4
	无患子	312.655	13.757	10.005	1	34.392	25.012	4
	榉树	188.402	8.290	6.029	2	22.133	16.097	4
	鹅掌楸	220.180	9.688	7.046	2	38.461	27.972	4

	银杏	195.700	8.611	6.262	2	23.249	16.908	4
	悬铃木	190.318	8.374	6.090	2	32.240	23.447	4
	三角枫	207.202	9.117	6.630	2	27.168	19.759	4
	重阳木	216.673	9.534	6.934	2	30.317	22.049	4
常绿乔木	石楠	190.977	8.403	6.111	2	25.797	18.762	4
Evergreen trees	深山含笑	62.503	2.750	2.000	3	5.748	4.180	3
	桂花	148.596	6.538	4.755	2	21.445	15.597	4
	冬青	305.220	13.430	9.767	1	93.739	68.174	1
	杜英	166.866	7.342	5.340	2	20.338	14.791	4
	香樟	299.338	13.171	9.579	1	54.396	39.560	2
	广玉兰	93.585	4.118	2.995	3	9.430	6.858	3
常绿灌木	蚊母树	72.930	3.209	2.334	3	10.493	7.631	3
Evergr-een shrubs								

I.日同化总量/ $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ Total assimilation; II.单位叶面积日固碳量/ $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ Daily carbon sequestration of unit leaf area per day; III.单位叶面积日释氧量/ $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ Daily oxygen release of unit leaf area; IV.聚类 Clustering analysis; V.单位土地面积日固碳量/ $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ Daily carbon sequestration of unit land area; VI.单位土地面积日释氧量/ $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ Daily oxygen release of unit land area; VII.聚类 Clustering analysis

3 讨论

不同树种净光合速率 (P_n) 日变化表现出不同的规律, 但都表现为早晚低、午间前后高的特点, 这是由于植物叶片 P_n 受太阳辐射的影响, 分析太阳辐射与净光合速率相关性可知, 光合有效辐射与 P_n 呈极显著的正相关 ($0.610, P < 0.01$)。早上 (7: 30 之前) 与傍晚 (17: 30 之后) 太阳辐射迅速降低, 植物叶片可利用太阳能减少, 净光合速率降低, 午间前后 P_n 较高则是因为植物可利用太阳能充足, 叶片光合器官具有较高的活性^[23]。

除冬青、广玉兰、深山含笑外其他树种 P_n 日变化多表现为双峰曲线, 存在明显的“光合午休”现象, 许多学者试图从同化物积累、生理节奏等角度对“光合午休”机理进行解释, 但迄今都尚无定论^[22]; 根据许大全对植物光合作用中光抑制、光合作用的“午睡”现象和气孔限制分析的相关论述^[32-34], 本文认为引起这种现象的主要原因可能是测定时段强光、高温、低湿等环境因子引起的气孔部分关闭或光抑制发生或者是叶片光合器官功能受到损害等。 P_n 午间降低的程度不同说明不同树种受环境因子的影响和抑制程度不同, 同时不同树种 P_n 的峰值时间不同也说明 17 个树种的光合作用对自然环境因子的响应具有一定差异性。

与何春霞^[25]、梁淑英^[26]、张娇^[27]、程剑锋^[28] 等学者的研究结果相比较, 本次研究表现出高光合速率、低光能利用率的特点, 其中悬铃木、三角枫、广玉兰、无患子、榉树、鹅掌楸的日均净光合速率分别高出 59%、19%、21%、24%、192% 和 163%,

这可能与本次试验选取在 2013 年夏季上海地区一个苗圃基地中进行有关, 因为测试期间太阳辐射强度较大、气温较高, 并且苗圃内养护管理条件较成熟、抚育管理措施恰当及时。

净光合速率与影响因子相关性分析中, 广玉兰净光合速率与蒸腾速率、气孔导度、太阳辐射、气温等相关性并不显著, 这与张苏峻^[35]的研究结果不同, 究其原因, 可能是因为测定时段内广玉兰地块的浇灌设施和人为活动有关; 除广玉兰外, 其他测试树种净光合速率与蒸腾速率、气孔导度、太阳辐射、气温等呈正相关, 其中大部分测试树种净光合速率与气孔导度、蒸腾速率等呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 的正相关, 说明气孔导度和蒸腾速率的变化是影响植物叶片净光合速率大小的主要因素, 且一定程度内, 太阳辐射、气温越高, 植物的光合能力越强, 这与吴芹的研究结果一致^[24]。

不同植物单位叶面积日固碳释氧量具有明显的差异, 无患子、冬青、香樟、广玉兰等单位叶面积日固碳释氧量较高, 这与王丽勉在上海地区^[30]的研究结果相一致; 净光合速率和叶面积指数是决定单位土地面积植物固碳释氧量的重要因素^[31], 冬青、香樟单位土地面积日固碳释氧量较其他树种都要高, 因为其叶面积指数远高于其他树种。在城市绿化的树种选择考虑植物的固碳释氧效益时, 应选择如无患子、冬青、香樟、广玉兰、鹅掌楸、重阳木、三角枫和银杏等固碳释氧能力较强的树种; 考虑到聚类分析中同一级的树种具有一定的生态相似性, 在城市绿化树种选择配置中, 应把固碳释氧能力相似的树种与具有季相等特殊观赏性的植物在时空上进行搭配, 以满足园林景观的美学效果。

4 结论

不同树种的净光合速率大小不同但都表现为早晚低、午间前后高的特点。无患子、香樟、冬青、白玉兰具有较高的光合耗能利用率,对太阳能有更强的利用能力,表现为光合能力和光合潜力较强,适于阳性区域大面积种植;栾树、广玉兰、蚊母树、深山含笑日均净光合速率和光合耗能利用率较低,生长较为缓慢,在城市绿化应用中需局部适量种植;不同树种净光合速率对自然环境因子的响应不相同,气孔导度和蒸腾速率的变化是影响植物叶片净光合速率大小的主要因素,在一定程度上太阳辐射、气温越高,植物的光合能力越强。

不同树种日固碳释氧能力具有显著的差异,就单位叶面积日固碳释氧能力而言,冬青、香樟、白玉兰、无患子最强,榉树、鹅掌楸、银杏、悬铃木、三角枫、重阳木、石楠、桂花、杜英次之,栾树、深山含笑、广玉兰和蚊母树最小;就单位土地面积日固碳释氧能力而言,冬青最好,香樟日固碳释氧能力次之,无患子、白玉兰、石楠、银杏、悬铃木、鹅掌楸、重阳木、桂花、杜英、榉树和三角枫一般,深山含笑、蚊母树、栾树及广玉兰最弱。

参考文献:

- [1] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [2] 张艳, 鲍文杰, 余琦, 等. 超大城市热岛效应的季节变化特征及其年际差异[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1121-1128.
- [3] LOVELL S T, JOHNSTON D M. Creating multifunctional landscapes: how can the field of ecology inform the design of the landscape?[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 7(4): 212-220.
- [4] 彭保发, 石忆邵, 王贺铸, 等. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律——以上海市为例[J]. *地理学报*, 2013, 68(11): 1461-1471.
- [5] PU S L, FANG J Y. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, 458:1009-1013.
- [6] Kramer P J, Kozlowski T T. *Physiology of trees*[M]. New York: McGraw-Hill, 1960.
- [7] 许大全. 光合作用及有关过程对长期高 CO₂ 浓度的响应[J]. *植物生理学通讯*, 1994(2): 81-87.
- [8] 蒋高明, 韩兴国, 林光辉. 大气 CO₂ 浓度升高对植物的直接影响——国外十余年来模拟实验研究之主要手段及基本结论[J]. *植物生态学报*, 1997(6): 2-15.
- [9] 俞继红. 3 种彩叶植物的光合特性比较[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(4): 21-25.
- [10] 杭夏子, 翁殊斐, 袁喆. 华南 5 种园林灌木叶性状特征及其对环境响应的研究[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(2): 243-247.
- [11] 黎蕾, 蔡传涛, 刘贵周. 光强和施氮量对催吐萝芙木叶片生长及光合作用的影响[J]. *武汉植物学研究*, 2010, 28(2): 206-212.
- [12] ROWNTREE R A, NOWAK D J. Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide[J]. *Journal of Arboriculture*, 1991, 17(10): 269-275.
- [13] 于艺婧, 马锦义, 袁韵珏. 中国园林生态学发展综述[J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2665-2675.
- [14] 管东生, 陈玉娟, 黄芬芳. 广州城市绿地系统碳的贮存、分布及其在碳氧平衡中的作用[J]. *中国环境科学*, 1998(5): 53-57.
- [15] 陈德祥, 李意德, 骆士寿, 等. 热带森林树种光合作用生理生态研究进展[J]. *江西农业大学学报*, 2004, 26(6): 905-911.
- [16] 郭太君, 林萌, 代新竹, 等. 园林树木增湿降温生态功能评价方法[J]. *生态学报*, 2014, 34(19): 5679-5685.
- [17] 张凯旋. 上海环城林带群落生态学与生态效益及景观美学评价研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [18] 郑中华. 上海绿化树种固碳耗水特性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [19] 陈明玲, 靳思佳, 阚丽艳, 等. 上海城市典型林荫道夏季温湿效应[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2013, 31(6): 81-85.
- [20] SCHMITT-HARSH M, MINCEY S K, PATTERSON M, et al. Private residential urban forest structure and carbon storage in a moderate-sized urban area in the Midwest, United States[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(4): 454-463.
- [21] 朱燕青. 常见灌木固碳释氧及降温增湿效应研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- [22] 于强, 任保华, 王天铎, 等. C3 植物光合作用日变化的模拟[J]. *大气科学*, 1998(6): 64-77.
- [23] 李大命, 阳振, 于洋, 等. 太湖春季和秋季蓝藻光合作用活性研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(11): 3053-3059.
- [24] 吴芹, 张光灿, 裴斌, 等. 3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应[J]. *生态学报*, 2013, 33(12): 3648-3656.
- [25] 何春霞, 李吉跃, 郭明, 等. 4 种乔木叶片光合特性和水分利用效率随树高的变化[J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 3008-3016.
- [26] 梁淑英, 胡海波, 夏尚光. 枫杨、悬铃木和女贞光合特性的比较[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(2): 135-138.
- [27] 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(6): 1740-1750.
- [28] 程建峰, 姜锟, 沈允钢. 修枝截干对二球悬铃木叶片光合特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 469-473.
- [29] 李飞. 园林植物景观设计对微气候环境改善的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [30] 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(3): 399-401.
- [31] 王宝琦, 刘志理, 戚玉娇, 等. 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态[J]. *生态学报*, 2014,

- 34(8): 1956-1964.
- [32] 许大全. 光合作用“午睡”现象的生态、生理与生化[J]. 植物生理学通讯, 1990(6): 5-10.
- [33] 许大全, 张玉忠, 张荣铎. 植物光合作用的光抑制[J]. 植物生理学通讯, 1992(4): 237-243.
- [34] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 1997(4): 241-244.
- [35] 张苏峻, 阮宏华, 胡海波, 等. 绿化树种白玉兰的光合特性[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2002, 26(5): 64-66.