

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

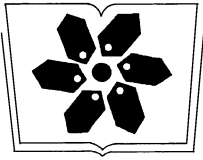
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第6期 Vol.33 No.6 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 6 期 2013 年 3 月 (半月刊)

目 次

专论与综述

基于遥感技术的森林健康研究综述..... 高广磊,信忠保,丁国栋,等 (1675)

Agent 农业土地变化模型研究进展..... 余强毅,吴文斌,杨 鹏,等 (1690)

个体与基础生态

辽东湾北部近海沙蜃的动态分布..... 王 彬,秦宇博,董 婧,等 (1701)

口虾蛄 proPO 基因全长 cDNA 的克隆与组织表达..... 刘海映,刘连为,姜玉声,等 (1713)

中缅树鼯头骨及下臼齿几何形态与环境的关系..... 朱万龙,贾 婷,黄春梅,等 (1721)

亚热带 3 种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响..... 季晓燕,江 洪,洪江华,等 (1731)

浙北地区常见绿化树种光合固碳特征..... 张 娇,施拥军,朱月清,等 (1740)

两种高质牧草不同生育期光合生理日变化及光响应特征..... 郭春燕,李晋川,岳建英,等 (1751)

基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术..... 张建平,赵艳霞,王春乙,等 (1762)

基于线粒体 DNA 控制区的斑翅草蛉不同地理种群遗传分化研究..... 周志军,尚 娜,刘 静,等 (1770)

圈养尖吻蝾螈雌体大小、窝卵数和卵大小之间的关系..... 胡明行,谭群英,杨道德 (1778)

应用寄生蜂和不育雄虫防控田间橘小实蝇..... 郑思宁,黄居昌,叶光禄,等 (1784)

青蒿素对外生菌根真菌化感效应..... 李 倩,袁 玲,王明霞,等 (1791)

种群、群落和生态系统

海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用..... 李纯厚,林 琳,徐姗楠,等 (1798)

上升流和水团对浙江中部近海浮游动物生态类群分布的影响..... 孙鲁峰,柯 昶,徐兆礼,等 (1811)

半干旱区生态恢复关键生态系统识别——以内蒙古自治区和林县为例.....

..... 彭 羽,高 英,冯金朝,等 (1822)

太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应..... 金冠一,赵秀海,康峰峰,等 (1832)

重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应..... 王轶浩,王彦辉,于澎湃,等 (1842)

景观、区域和全球生态

城市典型水域景观的热环境效应..... 岳文泽,徐丽华 (1852)

外来树种桉树引种的景观生态安全格局..... 赵筱青,和春兰 (1860)

基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究..... 施开放,刁承泰,孙秀锋,等 (1872)

大气 CO₂ 浓度升高对稻田根际土壤甲烷氧化细菌丰度的影响..... 严 陈,许 静,钟文辉,等 (1881)

资源与产业生态

基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价..... 柯丽娜,王权明,孙新国,等 (1889)

亚热带养殖海湾皱瘤海鞘生物沉积的现场研究..... 闫家国,齐占会,田梓杨,等 (1900)

黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征..... 张丽娜,李 军,范 鹏,等 (1907)

旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应…………… 张丁辰,蔡典雄,代 快,等 (1916)

商洛低山丘陵区农林复合生态系统中大豆与丹参的光合生理特性…………… 彭晓邦,张硕新 (1926)

外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应…………… 高会玲,刘金隆,郑青松,等 (1935)

基于侧柏液流的测定对 Granier 原始公式系数进行校正 …………… 刘庆新,孟 平,张劲松,等 (1944)

研究简报

湿地自然保护区保护价值评价方法…………… 孙 锐,崔国发,雷 霆,等 (1952)

干热河谷印楝和大叶相思人工林根系生物量及其分布特征…………… 高成杰,唐国勇,李 昆,等 (1964)

海滨沙滩单叶蔓荆对沙埋的生理响应特征…………… 周瑞莲,王 进,杨淑琴,等 (1973)

宁夏贺兰山、六盘山典型森林类型土壤主要肥力特征 …………… 姜 林,耿增超,张 雯,等 (1982)

学术争鸣

小兴安岭十种典型森林群落凋落物生物量及其动态变化…………… 侯玲玲,毛子军,孙 涛,等 (1994)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 …………… (2002)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 …………… (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 …………… (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说: 亭亭玉立的白桦树——白桦为落叶乔木,可高达 25m,胸径 50cm。其树冠呈卵圆形,树皮白色,纸状分层剥离;叶三角状、卵形或菱状卵形;花单性,雌雄同株。白桦树喜光,耐严寒,对土壤适应性强,喜酸性土,沼泽地、干燥阳坡及湿润阴坡都能生长。常与红松、落叶松、山杨、蒙古栎混生。白桦的天然更新好,生长较快,萌芽强,在人为的采伐迹地或火灾、风灾等自然损毁的迹地里,往往由白桦首先进入,为先锋树种,而形成白桦次生林。白桦分布甚广,我国大、小兴安岭及长白山均有成片纯林,在华北平原和黄土高原山区、西南山地亦为阔叶落叶林及针叶阔叶混交林中的常见树种。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb20127130989

张娇,施拥军,朱月清,刘恩斌,李梦,周建平,李建国. 浙北地区常见绿化树种光合固碳特征. 生态学报, 2013, 33(6): 1740-1750.

Zhang J, Shi Y J, Zhu Y Q, Liu E B, Li M, Zhou J P, Li J G. The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1740-1750.

浙北地区常见绿化树种光合固碳特征

张 娇^{1,2}, 施拥军^{1,2,*}, 朱月清⁴, 刘恩斌^{1,2}, 李 梦^{1,2}, 周建平³, 李建国³

(1. 浙江农林大学环境与资源学院, 临安 311300; 2. 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 临安 311300;

3. 嘉兴市交通投资集团有限责任公司, 嘉兴 314000; 4. 临安市农业技术推广中心, 临安 311300)

摘要: 高固碳能力的树种选择是营造优质碳汇林, 发展碳汇林业的重要基础工作。以浙北地区常见的 30 种造林绿化树种为研究材料, 利用 LI-6400 便携式光合测定仪, 测定树木光合日变化及不同光强梯度下光合作用的光响应特性, 并根据实验观测值进行计算, 对 30 个树种的日净固碳量和光合生理拟合参数进行 Ward 法聚类分析和因子分析。结果表明: 香樟的固碳量最大 ($(11.374 \pm 1.020) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), 其次为碧桃、垂柳、石栎、无患子, 固碳量最小的为红叶李 ($(2.178 \pm 0.605) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), 香樟和红叶李的日净固碳量有极显著差异 ($P < 0.01$); 树木的生理特性指标分析进一步反映了树种在浙北地区生长适应性及固碳能力大小, 同时, 根据树木的生理特性指标进行因子分析和聚类分析的结果, 香樟、碧桃在浙北地区生长适应性较好, 其次为无患子、垂柳、女贞等; 根据树种固碳量及生理指标综合测定分析, 建议在浙北地区造林绿化中可以优先选用香樟、碧桃、垂柳、无患子、石栎、女贞这些树种。

关键词: 日固碳量; 光合生理参数; 聚类分析; 因子分析; 光合固碳

The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang

ZHANG Jiao^{1,2}, SHI Yongjun^{1,2,*}, ZHU Yueqing⁴, LIU Enbin^{1,2}, LI Meng^{1,2}, ZHOU Jianping³, LI Jianguo³

1 School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China

2 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China

3 Jiaying Communication Investment Group CO. LTD, Jiaxing 314000, China

4 Agricultural Technology Service Center of Lin'an, Lin'an 311300, China

Abstract: Development of carbon sequestration forestry has made the species choice of high carbon sequestration capacity an important measure for planting superior quality carbon sink forests. The photosynthetic rate, light saturation point, light compensation point, maximum net photosynthetic rate, apparent quantum efficiency and other physiological indicators can be used to reflect the characteristics of carbon fixation and assimilation of CO₂ capacity. This research selected thirty common afforestation tree species in northern Zhejiang province as the research materials. They are *Ginkgo biloba* L., *Taxodium distichum* (L.) Rich., *Podocarpus nagi* (Thunb.) Kuntze, *Populus euramevicana*, *Salix babylonica* L., *Zelkova schneideriana* (Hand.) Mazz., *Celtis julianae* Schneid., *Magnolia grandiflora* L., *Magnolia denudate* Desr., *Michelia chapensis* Dandy, *Michelia maudiae* Dunn, *Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg., *Cinnamomum camphora* (L.) Prells, *Machilus pauhol kanehira*, *Amygdalus persica* var. *persica* f. *Duplex*, *Prunus cerasifera* f. *Atropurpurea*, *Cerasus yedoensis*, *Photinia × fraseri* Dress 'Red Robin', *Albizia julibrissin* Durazz., *Choerospondias axillaris*, *Acer buergerianum* Miq., *Ilex*

基金项目: 国家自然科学基金重大基金(61190114); 国家“973”重点基础研究发展规划项目基金(2011CB302705); 浙江省重点科技创新团队(2010R50030); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2011H22)资助

收稿日期: 2012-07-13; 修订日期: 2013-01-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: syjwwh@163.com

chinensis Sims, *Sapindus mukorossi* Gaertn, *Koelreuteria integrifoliola* Merr., *Diospyros glaucifolia*, *Osmanthus fragrans*, *Ligustrum lucidum*, *Liquidambar formosana* Hance, *Elaeocarpus glabripetalus* Merr., and *Lithocarpus glaber*. A portable LI-6400 photosynthesis apparatus is used to measure the photosynthetic diurnal variation and the responses of photosynthesis to different light intensities in the tested tree species. Ward cluster analysis was used to analyze the net sequestered carbon of 30 tree species, and both factor analysis and Ward cluster analysis were used to examine the fitting physiological parameters of photosynthesis. The results showed that *Cinnamomum camphora* (L.) Pres has the highest carbon fixation ($(11.374 \pm 1.020) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), followed by *Amygdalus persica* var. *persica* f. *duplex*, *Salix babylonica* L., *Lithocarpus glaber*, *Sapindus mukorossi* Gaertn and others, and *Prunus cerasifera* f. *atropurpurea* has the lowest ($(2.178 \pm 0.605) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$). *Cinnamomum camphora* (L.) Pres. has significantly higher net sequestered carbon ($P < 0.05$) than *Prunus cerasifera* f. *atropurpurea*. The physiological characteristics of these trees further reflect their growth adaptability and carbon sequestration capacity in northern Zhejiang province. According to the results of factor analysis and Ward cluster analysis, *Cinnamomum camphora* (L.) Pres. and *Amygdalus persica* var. *persica* f. *duplex* have better growth adaptability, followed by *Sapindus mukorossi* Gaertn, *Salix babylonica* L., *Ligustrum lucidum*. Therefore, these tree species are recommended for afforestation in northern Zhejiang. Because plant photosynthesis is a complex physiological process, the photosynthetic physiological indicators only show the characteristics of tree species in one aspect, and do not represent the pros and cons of the species. The conclusion obtained from comprehensive multi-index and cluster analysis is consistent with that from diurnal net carbon sequestration analysis, implying that the integrated indicators of physiological parameters can better reflect the relative inferiority of the carbon sequestration capacity. On the view of optimal afforestation tree configuration, more research is needed to combine photosynthesis and regional growth and adaptability of species and to improve their photosynthetic capacities.

Key Words: diurnal net carbon fixation; photosynthetically physiological parameters; cluster analysis; factor analysis; photosynthetic carbon sequestration

森林具有碳汇功能^[1],对缓解全球气候变暖、稳定和降低大气中温室气体浓度起着极为重要的作用^[2],通过森林碳汇来减少大气中二氧化碳的浓度已成为国际公认缓解气候变暖的有效途径^[3]。因此,在《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》中,与林业相关的措施受到了国际社会的高度关注,也成为中国应对气候变化的重要内容。2010年11月国家林业局开始启动我国碳汇造林试点工作,鼓励全国各地创新性地开展碳汇造林工作。然而,碳汇造林中涉及大量的造林树种,在相同的立地条件、林分结构下,树种个体的固碳能力决定了整个林分的固碳能力。因此,要提高绿化造林质量及其碳储量,了解树种的生态生理特性及固碳性能至关重要。

固碳能力是树木同化 CO_2 的能力,即树木的净光合作用能力。树木的生长是碳素化合物积累的过程,这些碳素化合物最终来自于光合作用所固定的 CO_2 。而通过研究树木的光合作用特征,分析其各种光合生理特征指标是确定树木固碳能力的重要方法。目前,学者们在树木的光合生理特性方面做了大量的研究^[4-7],目的在于说明该树木的光合作用能力或其环境适应性,而对于相同或相近条件下,不同树种固碳特征和固碳能力的比较研究却鲜有报道^[8-10]。但是,在大规模的造林活动中,尤其是营造以固碳为主要目的的碳汇林,其组成树种的固碳能力是决定整个碳汇林质量的关键因素。因此,研究并明确不同树种的固碳量或者固碳能力大小,对于合理筛选造林树种,提高森林质量,充分发挥营造森林的碳汇功能显得特别重要。本研究拟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浙北地区主要 30 种造林绿化树种进行系统的比较分析,探讨其光合固碳能力的优劣。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

本研究试验区选在浙江省临安市,其位于浙江省西北部,东临杭州市余杭区,地理坐标为东经 $118^\circ 51'$ 至

119°52', 北纬 29°56' 至 30°23', 属中亚热带季风气候区, 温暖湿润光照充足, 雨量充沛。本试验区全年降雨量 1628.6 mm, 全年平均气温 16.4 °C, 全年日照时数 1847.3 h 左右。

1.2 材料

选取浙北地区 30 种常见绿化造林树种(表 1), 各测试树种均选自浙江农林大学校区内, 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。

表 1 浙北地区 30 种常见绿化造林树种

Table 1 Thirty common tree species in northern Zhejiang

序号 Serial number	树种 Species	科 Family	属 Genus
1	银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	银杏科	银杏属
2	落羽杉 <i>Taxodium distichum</i> (L.) Rich	杉科	落羽杉属
3	竹柏 <i>Podocarpus nagi</i> (Thunb.) Kuntze	罗汉松科	竹柏属
4	意杨 <i>Populus eurameicana</i>	杨柳科	杨属
5	垂柳 <i>Salix babylonica</i> L.	杨柳科	柳属
6	榉树 <i>Zelkova schneideriana</i> (Hand.) Mazz	榆科	榉树属
7	珊瑚朴 <i>Celtis julianae</i> Schneid	榆科	朴属
8	广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i> L.	木兰科	木兰属
9	木兰 <i>Magnolia denudate</i> Desr.	木兰科	木兰属
10	乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i> Dandy	木兰科	含笑属
11	深山含笑 <i>Michelia maudiae</i> Dunn	木兰科	含笑属
12	鹅掌楸 <i>Liriodendron chinense</i> (Hemsl.) Sarg	木兰科	鹅掌楸属
13	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl	樟科	樟属
14	刨花楠 <i>Machilus pauhol kanehira</i>	樟科	楠属
15	碧桃 <i>Amygdalus persica</i> var. <i>persica</i> f. <i>duplex</i>	蔷薇科	李属
16	红叶李 <i>Prunus cerasifera</i> f. <i>atropurpurea</i>	蔷薇科	李属
17	日本晚樱 <i>Cerasus yedoensis</i>	蔷薇科	樱属
18	红叶石楠 <i>Photinia × fraseri</i> Dress 'Red Robin'	蔷薇科	石楠属
19	合欢 <i>Albizia julibrissin</i> Durazz.	豆科	合欢属
20	南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	漆树科	南酸枣属
21	三角枫 <i>Acer buergerianum</i> Miq.	槭树科	槭属
22	冬青 <i>Ilex chinensis</i> Sims	冬青科	冬青属
23	无患子 <i>Sapindus mukorossi</i> Gaertn	无患子科	无患子属
24	黄山栾树 <i>Koelreuteria integrifoliola</i> Merr.	无患子科	栾树属
25	浙江柿 <i>Diospyros glaucifolia</i>	柿科	柿属
26	桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	木犀科	木犀属
27	女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	木犀科	女贞属
28	枫香 <i>Liquidambar formosana</i> Hance	金缕梅科	枫香属
29	秃瓣杜英 <i>Elaeocarpus glabripetalus</i> Merr.	杜英科	杜英属
30	石栎 <i>Lithocarpus glaber</i>	壳斗科	栎属

1.3 方法

1.3.1 净光合速率日变化测定

试验测定于 2011 年 10 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。

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^[11]。植物日同化量按照公式(1)计算如下:

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

式中, P 为单位叶面积的日同化总量(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; t_{i+1} 为 $i+1$ 测点的时间(h); j 为测试次数; 3600 为每小时 3600 s; 1000 为 1000 μmol 。

一般植物晚上的暗呼吸消耗量按照白天同化量的 20% 计算^[12], 则单位叶面积日净固碳量按照公式(2)计算:

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

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(g/mol)。

具体数值见表 2, 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。

1.3.2 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: 2000、1500、1200、1000、800、500、300、100、80、50、30、10、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。

1.4 光响应数据处理

在 Excel 中进行数据筛选, 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 SPSS13.0 统计软件, 采用经典的 Farquhar 模型^[13]拟合 $P_n- PAR$, 并得到如下参数: 最大光合速率 (A_{max})、表观光量子效率 (Q)、暗呼吸速率 (RD); 对低光量子通量密度 ($PPFD$) (0—200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 下的净光合速率 (P_n) 进行线性回归分析, 求得光补偿点 (LCP), 且该直线的斜率 $dP_n/dPPFD$ 为表观量子效率 (Q)^[14-15]; 对高光强 (200—2000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 下的净光合速率模拟的二次多项式方程分析, 求得光饱和点 (LSP)^[16], 利用 one-way ANOVA 分析检验树种各生理特征指标的差异性, 具体数值见表 3。

Farquhar 模型:

$$P_n = (\text{light} \times Q + A_{\text{max}} - \sqrt{((Q \times \text{light} + A_{\text{max}})^2 - 4 \times Q \times A_{\text{max}} \times \text{light} \times K)}) / (2 \times K) - RD$$

式中, P_n 为净光合速率, light 为光合辐射强度, A_{max} 是最大净光合速率, Q 是表观量子效率, K 为曲角, RD 是暗呼吸速率。

2 结果与分析

植物光合作用的测定受到天气、温度、空气湿度等外界多方面环境的影响及仪器使用、人工处理数据造成的误差的影响, 仅对某一方面的光合特性分析不能充分说明树种固碳能力。因此, 本研究从树种的日净固碳量及相关的生理指标综合评价两方面, 系统的对树种固碳能力进行分析。

2.1 树种固碳量分析

2.1.1 树种日净固碳量

根据公式(1)和(2)的计算, 得到 30 种树种的日净固碳量(表 2)。由表 2 可知, 香樟的净同化量和日净固碳量最大, 红叶李的净同化量和日净固碳量最小, 同时, 香樟和红叶李有着极显著差异 ($P < 0.01$), 并与其他树种的有着显著差异 ($P < 0.05$)。碧桃、垂柳、无患子、石栎之间无显著差异 ($P > 0.05$), 但与其他树种有显著差异 ($P < 0.05$)。秃瓣杜英、南酸枣、意杨、冬青、三角枫、广玉兰、枫香、桂花、银杏、珊瑚朴、竹柏之间无显著差异 ($P > 0.05$)。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。

2.1.2 树种日净固碳量聚类分析

根据树种日净固碳量计算值, 对 30 个树种的日净固碳量分析采用系统聚类中的 Ward 法(亦称离差平方和法)。Ward 法的目的是将在一组中偏差(方差)尽可能增长最小的每一个对象(组)合并起来, 以此建立尽可能同种的类^[17]。Ward 法的类间距离与两类的样品数有较大的关系, 两个大的类倾向于较大的距离, 因而

不易合并,这往往符合对聚类的实际要求^[18]。因此在实际应用中,离差平方和法分类效果较好,应用比较广泛^[19-20]。

表 2 各树种日净固碳量

Table 2 Net diurnal carbon fixation of 30 species

序号 Serial number	树种 Species	净同化量 Net assimilation /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	日净固碳量 Net carbon fixation /(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	序号 Serial number	树种 Species	净同化量 Net assimilation /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	日净固碳量 Net carbon fixation /(g·m ⁻² ·d ⁻¹)
1	银杏	153.749±10.035ijkl	5.412±0.353g	16	红叶李	61.864±22.758n	2.178±0.605l
2	落羽杉	133.626±20.906jkl	4.704±0.736ij	17	日本晚樱	107.327±1.508m	3.778±0.053k
3	竹柏	143.058±4.075hijk	5.036±0.143hi	18	红叶石楠	184.591±21.137fg	6.498±0.744ef
4	意杨	170.602±72.670ghi	6.005±0.891gh	19	合欢	188.320±16.778fg	6.629±0.591ef
5	垂柳	255.206±26.044bc	8.983±0.917bc	20	南酸枣	168.382±18.628ghi	5.927±0.656bgh
6	榉树	128.600±8.659jkl	4.527±0.305j	21	三角枫	175.487±30.575fgh	6.177±1.076fgh
7	珊瑚朴	148.751±24.005ijkl	5.236±0.845hi	22	冬青	159.820±14.031hij	5.626±0.494h
8	广玉兰	169.869±10.850ghi	5.979±0.382gh	23	无患子	227.414±15.189bc	8.005±0.535c
9	木兰	117.700±4.998kl	4.143±0.176j	24	黄山栎树	192.743±44.723fg	6.785±1.574ef
10	乐昌含笑	208.204±11.518de	7.329±0.405d	25	浙江柿	124.869±14.269jkl	4.395±0.502j
11	深山含笑	197.133±17.507fg	6.939±0.616ef	26	桂花	155.234±15.968ijkl	5.464±0.562h
12	鹅掌楸	124.917±3.645l	4.397±0.128j	27	女贞	201.998±34.804ef	7.110±1.225de
13	香樟	323.134±30.647a	11.374±1.020a	28	枫香	162.267±13.195hij	5.712±0.464gh
14	刨花楠	201.852±15.811de	7.105±0.557de	29	秃瓣杜英	167.940±26.146ghi	5.911±0.920gh
15	碧桃	259.368±28.968b	9.130±1.079b	30	石栎	234.632±25.896bc	8.259±0.912c

同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

将 30 个树种样本各自看成一类,以日净固碳量作为衡量树种吸收 CO₂ 能力作为特征向量,用 Ward 法对树种日净固碳量进行聚类,聚类结果见图 1。根据图 1 可知,30 个树种的日净固碳量高低可分为 6 类,并根据公式计算得出的日净固碳量值进行类间排序,依次为:

第 1 类(日净固碳量极高) 香樟(11.374 g·m⁻²·d⁻¹);

第 2 类(日净固碳量高) 碧桃(9.130 g·m⁻²·d⁻¹)、垂柳(8.983 g·m⁻²·d⁻¹)、石栎(8.259 g·m⁻²·d⁻¹)、无患子(8.005 g·m⁻²·d⁻¹);

第 3 类(日净固碳量中等) 乐昌含笑(7.329 g·m⁻²·d⁻¹)、女贞(7.110 g·m⁻²·d⁻¹)、刨花楠(7.105 g·m⁻²·d⁻¹)、深山含笑(6.939 g·m⁻²·d⁻¹)、黄山栎树(6.785 g·m⁻²·d⁻¹)、合欢(6.629 g·m⁻²·d⁻¹)、红叶石楠(6.498 g·m⁻²·d⁻¹);

第 4 类(日净固碳量偏下) 三角枫(6.177 g·m⁻²·d⁻¹)、意杨(6.005 g·m⁻²·d⁻¹)、广玉兰(5.979 g·m⁻²·d⁻¹)、南酸枣(5.927 g·m⁻²·d⁻¹)、秃瓣杜英(5.911 g·m⁻²·d⁻¹)、枫香(5.712 g·m⁻²·d⁻¹)、冬青(5.626 g·m⁻²·d⁻¹)、桂花(5.464 g·m⁻²·d⁻¹)、银杏(5.412 g·m⁻²·d⁻¹)、珊瑚朴(5.236 g·m⁻²·d⁻¹)、竹柏(5.036 g·m⁻²·d⁻¹);

第 5 类(日净固碳量低) 落羽杉(4.704 g·m⁻²·d⁻¹)、鹅掌楸(4.397 g·m⁻²·d⁻¹)、木兰(4.143 g·m⁻²·d⁻¹)、日本晚樱(3.778 g·m⁻²·d⁻¹)、浙江柿(4.395 g·m⁻²·d⁻¹)、榉树(4.527 g·m⁻²·d⁻¹);

第 6 类(日净固碳量极低) 红叶李(2.178 g·m⁻²·d⁻¹)。

其中,第 1 类和第 2 类日净固碳量比较相近,固碳能力较高;第 3 类和第 4 类日净固碳量相近,但与第 1 类和第 2 类相比较处于较低水平,比第 5 类和第 6 类高;而第 5 类和第 6 类日净固碳量相近,处于低水平。因此,在日后的造林活动中,从日净固碳能力的角度出发,建议多营造以香樟为主的第 1 类和第 2 类树种,第 3 类和第 4 类树种相辅之,最好不要采用第 5 类和第 6 类树种。

2.2 树种光响应拟合参数分析

2.2.1 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

(R_d)是描述其光合作用特征的重要生理生态参数^[21]。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(表 3)。

(1) 光饱和点和光补偿点

植物叶片光饱和点和光补偿点的高低反映了植物对光照强度的需求及植物光强利用范围,代表了植物的需光特性和需光量。由表 3 比较得出,三角枫光饱和点最大($2138.778 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),光补偿点较高($46.837 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),光强利用范围最大,在充足的光照条件下,三角枫会吸收更多的 CO_2 ;红叶李光饱和点和光补偿点均较低,分别为 $1307.752 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $24.913 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,两者差值在所有所选树种中最小,表明红叶李可利用光合辐射范围最小,光合作用能力弱。

在树种光饱和点显著差异性上,三角枫、刨花楠、广玉兰、乐昌含笑、深山含笑、黄山栾树之间无显著差异($P>0.05$),其它 24 种树种之间无显著差异($P>0.05$),其中,三角枫和刨花楠无显著差异($P>0.05$),但显著高于其它 24 种树种($P<0.05$)。在树种光补偿点显著差异性上,乐昌含笑,[秃瓣杜英、榉树],[银杏、三角枫],[南酸枣、木兰、广玉兰、合欢、冬青],[红叶李、落羽杉、鹅掌楸、刨花楠、碧桃],[香樟、竹柏、黄山栾树、红叶石楠、垂柳、深山含笑、枫香、石栎、浙江柿]可以分别成组,组内无显著差异($P>0.05$),组间差异显著($P<0.05$)。

(2) 最大净光合速率和暗呼吸速率

由表 3 可知,垂柳的最大净光合速率最大,为 $18.783 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,其次为碧桃、合欢、香樟等,说明其对光能利用潜力大,其中垂柳最大;而红叶李对光能的利用潜能最小,为 $4.190 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。各树种在最大净光合速率的差异性可以成组表示,分为[垂柳、碧桃、香樟、三角枫、合欢],[广玉兰、银杏、女贞、刨花楠、南酸枣],[石栎、鹅掌楸、木兰、秃瓣杜英],[日本晚樱、红叶李、深山含笑、枫香、榉树]4 组,组内无显著差异($P>0.05$),组间差异显著($P<0.05$)。

暗呼吸速率 R_d 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^[22]。由表 3 可知,枫香具有最小的暗呼吸速率,为 $0.141 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,其在夜晚呼吸消耗的有机物最少,其次是石栎、秃瓣杜英、深山含笑等树木在夜晚呼吸作用较弱;暗呼吸速率最大的是银杏,为 $2.530 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,其在夜间呼吸作用强烈,消耗当日积累的有机物最多。各树种在按呼吸速率的差异性可以分为银杏,[无患子、合欢、鹅掌楸、碧桃、珊瑚朴],[桂花、冬青、意杨、红叶石楠、三角枫、日本晚樱、黄山栾树、落羽杉、女贞、香樟、垂柳、红叶李、南酸枣],[竹柏、木兰、秃瓣杜英、乐昌含笑、石栎、深山含笑、枫香]4 组,组内无显著差异($P>0.05$),组间差异显著($P<0.05$),其中,银杏显著高于其他组。

(3) 表观量子效率

表观量子效率是植物对 CO_2 同化的表观光量子效率,反映了植物进行光合作用时的光能利用效率,尤其是在弱光条件下^[23]。由表 3 可知,银杏的表观光量子效率最大,为 0.081,表明银杏对光的响应敏感性较强,在弱光条件下,还可进行 CO_2 同化;而三角枫的表观光量子效率最小,为 0.019,说明三角枫的光能利用效率低,尤其是对弱光的利用能力低,在弱光环境下,对 CO_2 的同化速率低,建议在对三角枫栽植中宜选择光照充足的地块,其他树种的表观量子效率集中在 0.02—0.08 之间。各树种的表观光量子效率差异性可以分为[银

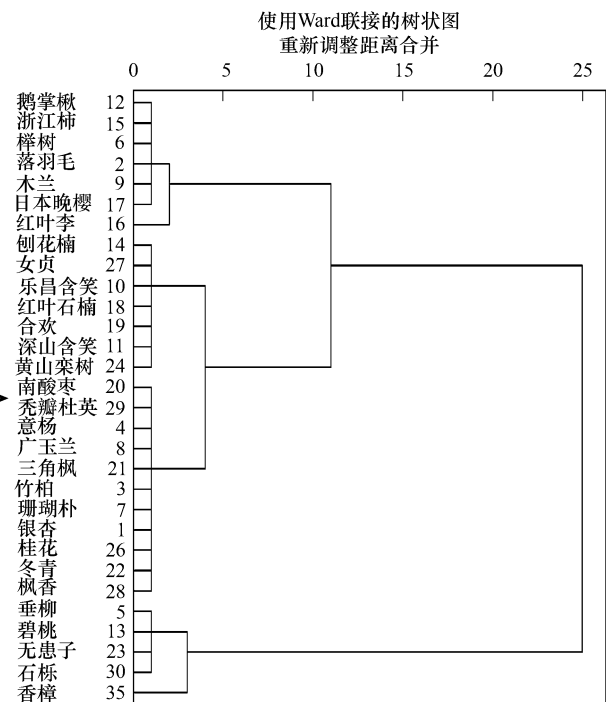


图 1 30 个树种日净固碳量聚类分析结果

Fig. 1 Cluster analysis on diurnal net carbon fixation of thirty tree species

杏、秃瓣杜英、红叶石楠、竹柏、榉树、无患子、南酸枣、落羽杉、石栎、意杨、鹅掌楸、垂柳、碧桃、桂花、珊瑚朴、合欢], [红叶李、深山含笑、木兰], [刨花楠、广玉兰、乐昌含笑], [浙江柿、三角枫] 4 组, 组内无显著差异 ($P > 0.05$), 组间差异显著 ($P < 0.05$); 同时, 银杏的表现量子效率显著高于三角枫 ($P < 0.05$)。

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

Table 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 Serial number	树种 Species	光饱和点 Light saturation point / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	光补偿点 Light compensation point / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	表观量子效率 Apparent quantum yield	暗呼吸速率 Dark respiration rate / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
1	香樟	1487.586±53.622bcde	10.111±10.026jkl	15.573±1.273ab	0.051±0.149bc	0.576±0.469de
2	银杏	1419.720±38.420e	57.158±12.398c	10.186±1.001ef	0.081±0.0379a	2.530±0.868a
3	落羽杉	1383.752±80.107e	28.539±15.732fg	8.498±0.283fg	0.063±0.011ab	0.438±0.160de
4	桂花	1586.630±44.086cde	29.983±3.680ef	8.392±1.134fgh	0.0637±0.0416ab	0.519±1.012d
5	黄山栎树	1711.949±104.201abcd	1.058±10.807kl	9.929±6.612efg	0.0385±0.037bc	0.527±1.493de
6	冬青	1476.605±75.365de	18.165±9.674i	6.200±0.787ji	0.043±0.029bc	0.596±0.709de
7	无患子	1446.107±34.683e	39.428±11.879def	14.552±0.062bc	0.063±0.011ab	2.030±0.266b
8	榉树	1423.059±47.856e	60.420±3.008b	4.216±0.344j	0.061±0.020ab	0.286±0.319ef
9	广玉兰	1900.329±168.453ab	35.224±7.384de	11.714±4.872de	0.020±0.0207ef	0.352±1.364jk
10	垂柳	1591.571±85.546cde	5.4523±10.563kl	18.783±1.15a	0.053±0.017ab	0.493±0.677de
11	鹅掌楸	1431.754±135.563e	23.370±15.980fgh	8.519±1.917hi	0.078±0.085ab	1.414±1.303c
12	木兰	1514.593±46.790cde	39.680±5.633d	7.159±0.803hi	0.037±0.021cd	0.238±0.659fg
13	枫香	1527.993±85.345cde	3.175±1.346kl	4.984±0.919j	0.044±0.0417bc	0.141±0.077gh
14	女贞	1658.885±129.688bcde	9.032±6.390jk	9.841±1.440ef	0.039±0.027bc	0.435±1.038de
15	秃瓣杜英	1426.221±25.571e	69.939±24.743b	6.985±0.616ij	0.073±0.030ab	0.172±0.490gh
16	红叶李	1307.752±61.004e	24.913±8.018fg	4.190±0.092j	0.036±0.003cd	0.422±0.065de
17	碧桃	1415.954±54.452e	20.788±3.291ghi	16.913±0.529ab	0.058±0.007ab	1.416±0.244c
18	深山含笑	1798.211±90.346abc	3.385±6.105kl	4.301±1.011j	0.026±0.029cd	0.187±0.837hi
19	三角枫	2138.778±130.247a	46.837±18.249c	13.459±25.935ab	0.019±0.016h	0.510±0.882de
20	珊瑚朴	1368.251±55.709e	17.640±20.136ij	8.206±0.276fgh	0.047±0.007ab	1.091±0.151c
21	南酸枣	1383.964±108.403e	39.363±1.683d	9.455±0.493efg	0.080±0.020ab	0.399±0.452de
22	乐昌含笑	1912.071±169.325ab	75.751±9.012a	6.730±2.722hi	0.022±0.027ef	0.546±1.237k
23	合欢	1466.164±54.099bcde	34.720±2.496def	16.272±0.655ab	0.038±0.005ab	1.300±0.219c
24	刨花楠	1972.042±182.648a	26.924±8.362ghi	9.781±3.214ef	0.023±0.026ef	0.216±1.447ij
25	意杨	1423.424±38.520e	17.355±21.743ij	11.149±0.472cd	0.068±0.010ab	0.674±0.226de
26	石栎	1587.230±122.406bcde	0.952±15.481l	7.402±1.115gh	0.050±0.035ab	0.143±0.943gh
27	红叶石楠	1365.979±134.887e	5.742±6.346kl	13.507±0.638bc	0.077±0.015ab	0.563±0.359de
28	竹柏	1439.713±90.492cde	7.866±5.845kl	5.936±0.664ij	0.076±0.037ab	0.157±0.619fg
29	日本晚樱	1305.019±34.830e	17.761±7.203hi	5.273±0.407j	0.045±0.015bc	0.551±0.277de
30	浙江柿	1653.685±155.263bcde	10.359±6.842l	6.995±1.195hi	0.020±0.014gh	0.183±0.686ij

同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

2.2.2 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浙北地区生长的适应性, 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 SPSS13.0 对树种 5 个光合特征指标拟合参数进行因子分析, 通过分析旋转后的因子载荷矩阵, 提

取特征值大于 1 的 3 个因子作为公因子(表 4),同时,根据表 5 分析可知:与第 1 公因子密切相关的是暗呼吸速率及光饱和点,相关系数绝对值分别为 0.894 和 0.939,反映了树木有机物积累和消耗的强弱;与第 2 公因子密切相关的是最大净光合速率及表观光量子,相关系数分别为 0.929 和 0.713,反映了树木光能利用潜能大小;与第 3 公因子密切相关的是光饱和点和光补偿点,相关系数分别为 0.990 和 0.977,反映了树木光能利用范围。这 3 个公因子的累计方差贡献率为 95.700%(表 4),能反映 5 个变量的绝大部分信息,可以近似替代所有的参数信息。

表 4 总方差解释表

Table 4 Total analysis of variance

主成分 Component	特征值 Initial eigenvalues			旋转载荷贡献 Extraction sums of squared loadings		
	λ	方差贡献率/% of variance	累计贡献率 Cumulative/%	特征值 Total	方差贡献率/% of variance	累计贡献率 Cumulative/%
1	1.998	39.956	39.956	1.998	39.956	39.956
2	1.323	31.463	71.419	1.323	31.463	71.419
3	1.064	24.281	95.700	1.064	24.281	95.700

(2) 公因子聚类分析

用 SPSS13.0 对树种 5 个光合特征指标参数进行因子分析产生的 3 个公共因子得分,并根据各自权重,求得在浙北地区这 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 1 类 香樟、碧桃;

第 2 类 无患子、垂柳、女贞、石栎、红叶石楠、深山含笑、乐昌含笑、黄山栾树、刨花楠、合欢;

第 3 类 桂花、银杏、秃瓣杜英、竹柏、日本晚樱、冬青、意杨、木兰、三角枫;

第 4 类 南酸枣、珊瑚朴、枫香、鹅掌楸、广玉兰、落羽杉;

第 5 类 榉树、浙江柿、红叶李。

根据聚类分析分类结果可知,在浙北地区,香樟和碧桃的自身生长适应性较好;其次是黄山栾树、刨花楠、合欢等第二类树种适应性基本一致,处于中上水平;第三类及第四类树种生长适应性一般;而榉树、浙江柿及红叶李生长较差,这与所测各项生理指标值相符合,并可以解释树种在浙北地区生长适应性差异。

3 讨论与结论

综上所述,通过对浙北地区主要 30 种树种的光合特性测定,从树种的固碳量大小、光合生理指标分析以及各指标综合评价等方面,可以得到如下几点:

(1)植物的光合作用即 CO_2 和 O_2 交换过程实际上是植物与外界环境进行能量转化的过程,净固碳量高说明此树种与外界交换的 CO_2 和 O_2 较多^[28],积累于体内的有机质含量高。就日净固碳量而言,王丽勉等人夏季对上海 151 种绿化树种单叶日净固碳释氧量能力进行了研究,结果表明,垂柳固碳能力很强,桃、冬青、香樟、银杏、浙江柿、栾树、女贞、广玉兰的固碳能力为中等,榉树、枫香、日本晚樱、红叶石楠、桂花的固碳能力较弱^[9],与本试验树种日净固碳量能力大小排序(香樟>碧桃>垂柳>女贞>黄山栾树>红叶石楠>广玉兰>枫香>冬青>桂花>银杏>榉树>浙江柿>木兰>日本晚樱)稍有不同,这与所测季节及树木生长立地环境不同有关,有待进一步研究。从本试验的研究结果看,在浙北地区营造碳汇林,可优先选用并大量栽植香樟、碧桃、垂柳等树种,可适当配置一些固碳量稍低的树种,如榉树、木兰,日本晚樱等,以满足森林景观和园林景观需求。

表 5 旋转后的因子载荷矩阵

Table 5 Rotated Component Matrix

因素 Factor	主成分 Component		
	1	2	3
LSP	-0.939	0.044	0.990
LCP	-0.030	0.000	0.977
A_{\max}	-0.091	0.929	-0.145
Rd	0.894	0.150	0.098
Q	0.375	0.713	0.365

(2) LSP 表示植物同化 CO_2 的最大能力, 光饱和点越高说明植物对光强接受越高, 固碳释氧量越大; 同时, 光饱和点越高、光补偿点越低, 即两者差值越大, 说明植物适应的光照幅度越大, 净光合同化量越大, 光合能力越强。本试验中三角枫光饱和点最高, 且光强利用范围最大, 红叶李光饱和点最低, 且光强利用范围最小; 其中, 女贞、垂柳、香樟、石栎对光强的利用处于中上水平。

(3) A_{\max} 是决定植物利用光能潜力大小的重要度量, 是植物生长速度的一个重要参数指标^[24], 而 R_d 的大小是植物消耗白天积累的有机物强弱的指标。有研究表明: 在弱光环境下, 植物会通过降低呼吸, 使光合作用同化的能力最大比例储存在光合组织中^[25]。吴统贵等研究林下植物光合特征得出, 香樟具有较高的最大净光合速率, 在光强降低时, 主要通过降低光饱和点和补偿点, 即以低的暗呼吸速率来适应弱光环境^[29], 与本试验的香樟结果基本一致。在对树木进行日固碳量计算时, 考虑到夜间呼吸消耗, 采用能量最大传递效率 20%, 即按照同一水平的呼吸效率进行计算, 但在本试验中各树种的暗呼吸速率都不相同, 这与植物的不同发育期、活性状态和环境条件不同有关。

(4) Q 越大, 表明该植物吸收与转换光能的色素蛋白复合体可能越多, 利用弱光的能力越强^[26]。对于长势良好的植物, Q 一般在 0.04—0.07 之间^[27], 同时, 在实验室适宜条件下, 理论上量子效率不会大于 0.125^[27], 本试验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、三角枫、刨花楠、浙江柿值偏小, 显著低于其他树种, 这与树种在浙北地区受到的环境胁迫有关, 如光照、温度、辐射、酸雨等, 而其他树种对浙北地区的环境较适应。

(5) 所测的各项光合生理指标只能说明树种某一方面的特征, 不能完全代表这个树种自身的适应性优劣, 且各种指标会出现并不完全一致的表征倾向, 但根据多指标综合及聚类分析, 可以得到与日净固碳量分析基本一致的分类结论, 这进一步表明生理参数的综合指标评价也可以良好反映该树种固碳能力的大小。如香樟的综合得分最高, 同时日固碳最大; 而如榉树、红叶李、浙江柿、日本晚樱等各项生理指标均较差, 虽然个别生理特征值较好, 但其综合得分值很低, 其日固碳量也很低。虽然它们作为园林景观树被大量栽植, 但根据其光合作用各项生理指标值及固碳能力大小, 仅适合作绿化点缀树种栽植; 而香樟、碧桃、垂柳、无患子、石栎、女贞等树种在光合作用中有着自身独特的优势, 固碳能力也较强, 建议在浙北地区碳汇造林中优先选用。

(6) 植物的光合作用是一个复杂的生理过程, 尤其是受到外界多变的环境因素对其的影响。在今后的研究中, 应多将这些相互联系、相互制约的影响因素应用多种分析方法综合起来, 分析树种的固碳能力及其碳储量潜能, 在此基础上针对如何提高其光合作用能力, 结合树种对地区生长适应性优化造林树种配置方面还需要做大量的研究。本研究只是针对一个季节中一段时间内的植物光合生理反应产生的累积物, 不能代表各自年生产力大小, 还需要持续观察其生产力的变化, 以便能够进一步说明树种的生产力大小。

References:

- [1] Zhang X Q, Wu S H. China CDM Afforestation and Reforestation Project Guide. Beijing: China Forestry Publishing, 2006: 1-1.

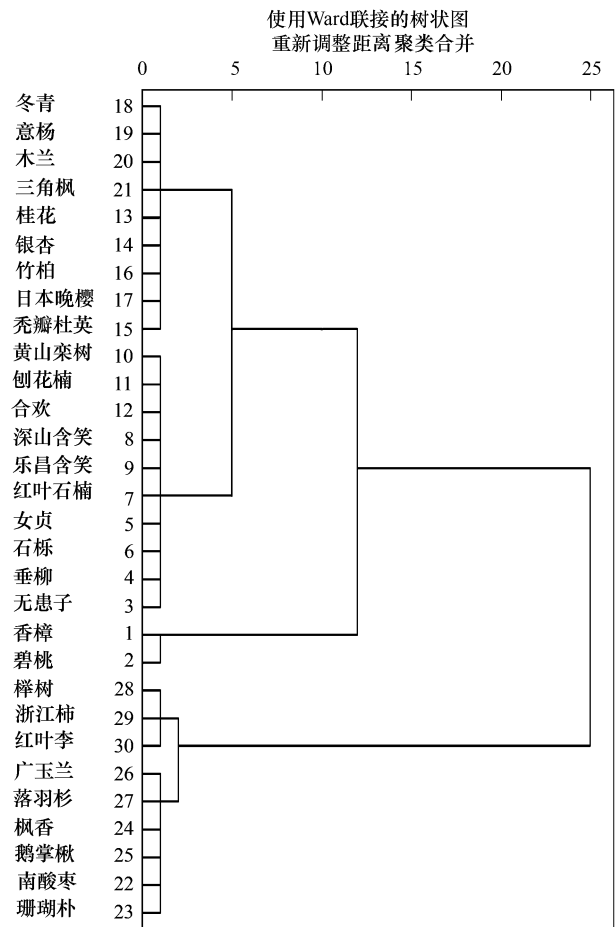


图 2 30 个树种生理参数聚类分析结果

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

- [2] Ravindranath N H, Ostwald M. Carbon Inventory Methods. Beijing: China Forestry Publishing, 2009: 1-2.
- [3] IPCC. IPCC Fourth assessment report [EB/OL]. [2009-06-12]. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_cn.pdf, 2010-02-04/2010-03-04.
- [4] Peek M S, Russek-Cohen E, Wait A D, Forseth I N. Physiological response curve analysis using nonlinear mixed models. *Oecologia*, 2002, 132(2): 175-180.
- [5] Wu J B, Guan D X, Sun X M, Zhang M, Shi T T, Han S J, Jin C J. Photosynthetic characteristics of dominant tree species and canopy in the broadleaved Korean pine forest of Changbai Mountains. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2006, 49(S2): 89-98.
- [6] Zhang Z F, Huang Y Q, Mo L, Yuan W Y. Photosynthesis light response characteristics of four limestone plants in Karst area. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(1): 44-48.
- [7] Wang R, He Q, Li J Y, Zhang F Q, Ding X G, Zhu B Z, Pan W. Photosynthetic characteristics of twelve rare tree species in China. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(11): 15-20.
- [8] Lu G Q, Yin Z F, Gu J C, Meng D X, Wu H X, Li Y J. A research on the function of fixing carbon and releasing oxygen of afforestation trees along the main road in Dalian City. *Journal of Agriculture University of Hebei*, 2006, 29(6): 49-51.
- [9] Wang L M, Hu Y H, Qin J, Gao K, Huang J. Carbon fixation and oxygen production of 151 plants in Shanghai. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2007, 26(3): 399-401.
- [10] Wang Z J. Research on vegetation quantity and carbon-fixing and oxygen-releasing effects of Fuzhou Botanical Garden. *Chinese Landscape Architecture*, 2010, 26(12): 1-6.
- [11] Liu J J, Wang Z G, Yan A H, Bi Y G. Photosynthetic characteristics and functions of carbon fixation and oxygen release of twelve species of colorful plants. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(9): 23-26.
- [12] Wang L M, Qin J, Gao K, Huang J, Hu Y H. Study on carbon fixation and oxygen production of indoor plants. *Collected papers of Chinese Horticulture Society and Ornamental Horticulture Professional Committee in 2007*, 2007, (6): 647-649.
- [13] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. Models of photosynthesis. *Plant Physiology*, 2001, 125(1): 42-45.
- [14] Von Caemmerer S, Farquhar G D. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta*, 1981, 153(4): 376-387.
- [15] Institute of Shanghai Plant Physiology of Chinese Academy of Science, the Shanghai Society of Plant Physiology. *Experimental Guide of Modern Plant Physiology*, Shanghai: Science Press, 1999: 83-95.
- [16] Su P X, Liu X M, Zhang L X, Zhao A F, Li W R, Chen H S. Comparison of $\delta^{13}\text{C}$ values and gas exchange of assimilating shoots of desert plants *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum* with other plants. *Israel Journal of Plant Sciences*, 2004, 52(2): 87-97.
- [17] Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R. *Multivariate Analysemethoden: Eine Anwendungsorientierte Einführung*. New York: Springer, 2009.
- [18] Wang X M. *Applied of Multivariate Analysis*. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Publishing, 2009.
- [19] He X Q. *Multivariate Statistical Analysis*. Beijing: China Renmin University Press, 2004: 55-59.
- [20] Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. New York: Springer, 2009.
- [21] Pan R Z, Wang X J, Li N H. *Phytophysiology*. 5th ed. Beijing: Advanced Education Press, 2004: 87-90.
- [22] Coley P D. Herbivory and defensive characteristics of tree species in a lowland tropical forest. *Ecological Monographs*, 1983, 53(2): 209-233.
- [23] Yang Z M, Chen Y, Han L B, Li Z H. Effects of different light intensity on characters and physiological indexes of *Festuca arundinacea*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(6): 23-29.
- [24] Xie H C, Jiang Z L, Li J H. The photosynthetic characteristics in leaves of oriental Oak forest. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2004, 28(5): 83-85.
- [25] Joesting H M, McCarthy B C, Brown K J. Determining the shade tolerance of American chestnut using morphological and physiological leaf parameters. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(1): 280-286.
- [26] Gregoriou K, Pontikis K, Venmos S. Effects of reduced irradiance on leaf morphology, photosynthetic capacity, and fruit yield in olive (*Olea europaea* L.). *Photosynthetica*, 2007, 45(2): 172-181.
- [27] Long S P, Humphries S, Falkowski P G. Photo-inhibition of photosynthesis in nature. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1994, 45(1): 633-662.
- [28] Wu T G, Yu M K, Sun H J, Li H X, Zhang C, Cheng X R. Photosynthetic response to different irradiances of undergrowth plants in tree-herb plantation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*. 2011, 19(2): 338-341.
- [29] Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, Aubinet M, Bakwin P, Berbigier P, Bernhofer C, Burba G, Clement R, Davis K J, Elbers J A, Goldstein A H, Grelle A, Granier A, Guðmundsson J, Hollinger D, Kowalski A S, Katul G, Law B E, Malhi Y, Meyers T, Monson R K, Munger J W,

Oechel W, Paw U K T, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Valentini R, Wilson K, Wofsy S. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 53-74.

参考文献:

- [1] 张小全, 武曙红. 中国 CDM 造林再造林项目指南. 北京: 中国林业出版社, 2006: 1-1.
- [2] Ravindranath N H, Ostwald M. 林业碳汇计量. 北京: 中国林业出版社, 2009: 1-2.
- [3] IPCC. IPCC 第四次评估报告[EB/OL]. [2009-06-12]. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_cn.pdf, 2010-02-04/2010-03-04.
- [6] 张中峰, 黄玉清, 莫凌, 袁维园. 岩溶区 4 种石山植物光合作用的光响应. *西北林学院学报*, 2009, 24(1): 44-48.
- [7] 王冉, 何茜, 李吉跃, 张方秋, 丁晓纲, 朱报著, 潘文. 中国 12 种珍稀树种光合生理特性. *东北林业大学学报*, 2010, 38(11): 15-20.
- [8] 陆贵巧, 尹兆芳, 谷建才, 孟东霞, 武会欣, 李永杰. 大连市主要行道树绿化树种固碳释氧功能研究. *河北农业大学学报*, 2006, 29(6): 49-51.
- [9] 王丽勉, 胡永红, 秦俊, 高凯, 黄娟. 上海地区 151 种绿化植物固碳释氧能力的研究. *华中农业大学学报*, 2007, 26(3): 399-401.
- [10] 王忠君. 福州植物园绿量与固碳释氧效益研究. *中国园林*, 2010, 26(12): 1-6.
- [11] 刘嘉君, 王志刚, 阎爱华, 毕拥国. 12 种彩叶树种光合特性及固碳释氧功能. *东北林业大学学报*, 2011, 39(9): 23-26.
- [12] 王丽勉, 秦俊, 高凯, 黄娟, 胡永红. 室内植物的固碳放氧研究 // 2007 年中国园艺学会观赏园艺专业委员会年会论文集. 北京: 中国园艺学会, 2007(6): 647-649.
- [18] 王学民. 应用多元分析. 上海: 上海财经大学出版社, 2009.
- [19] 何晓群. 多元统计分析. 北京: 中国人民大学出版社, 2004: 55-59.
- [21] 潘瑞炽, 王小菁, 李娘辉. 植物生理学(第五版). 北京: 高等教育出版社, 2004: 87-90.
- [23] 杨志民, 陈煜, 韩烈保, 李志华. 不同光照强度对高羊茅形态和生理指标的影响. *草业学报*, 2007, 16(6): 23-29.
- [24] 谢会成, 姜志林, 李际红. 栓皮栎林光合特性的研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2004, 28(5): 83-85.
- [28] 吴统贵, 虞木奎, 孙海菁, 李会欣, 张翠, 成向荣. 林药复合系统林下植物光合特性对生长光强的响应. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 338-341.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 6 March, 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Review and Monograph

- Forest health studies based on remote sensing: a review GAO Guanglei, XIN Zhongbao, DING Guodong, et al (1675)
Progress of agent-based agricultural land change modeling: a review YU Qiangyi, WU Wenbin, YANG Peng, et al (1690)

Autecology & Fundamentals

- Dynamic distribution of *Nemopilema nomurai* in inshore waters of the northern Liaodong Bay, Bohai Sea
..... WANG Bin, QIN Yubo, DONG Jing, et al (1701)
Full length cDNA cloning and tissue expression of prophenoloxidase from *Oratosquilla oratoria*
..... LIU Haiying, LIU Lianwei, JIANG Yusheng, et al (1713)
Morphometrics investigation of the skulls, mandibles and molar in *Tupaia belangeri* from Yunnan, Guizhou, Guangxi
..... ZHU Wanlong, JIA Ting, HUANG Chunmei, et al (1721)
Effects of litter thickness on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests
..... JI Xiaoyan, JIANG Hong, HONG Jianghua, et al (1731)
The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang
..... ZHANG Jiao, SHI Yongjun, ZHU Yueqing, et al (1740)
Diurnal changes in the photosynthetic characteristics of two high yield and high quality grasses during different stages of growth
and their response to changes in light intensity GUO Chunyan, LI Jinchuan, YUE Jianying, et al (1751)
Evaluation technology on drought disaster to yields of winter wheat based on WOFOST crop growth model
..... ZHANG Jianping, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi, et al (1762)
Genetic diversity of *Conocephalus maculatus* of different geographic populations based on mitochondrial DNA control region analysis ...
..... ZHOU Zhijun, SHANG Na, LIU Jing, et al (1770)
Relationships among female body size, clutch size, and egg size in captive *Deinagkistrodon acutus*
..... HU Minghang, TAN Quanying, YANG Daode (1778)
The field control of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) with parasitoid and sterile male
..... ZHENG Sining, HUANG Juchang, YE Guanglu, et al (1784)
Allelopathic effects of artemisinin on ectomycorrhizal fungi LI Qian, YUAN Ling, WANG Mingxia, et al (1791)

Population, Community and Ecosystem

- Establishment of integrated methodology for bay ecosystem health assessment and its application in Daya Bay
..... LI Chunhou, LIN Lin, XU Shannan, et al (1798)
The influence of upwelling and water mass on the ecological group distribution of zooplankton in Zhejiang coastal waters
..... SUN Lufeng, KE Chang, XU Zhaoli, et al (1811)
Identification of key ecosystem for ecological restoration in semi-arid areas: a case study in Helin County, Inner Mongolia
..... PENG Yu, GAO Ying, FENG Jinzhao, et al (1822)
The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain
..... JIN Guanyi, ZHAO Xiuhai, KANG Fengfeng, et al (1832)
The litter-fall characteristics and their response to drought stress in the Masson pins forests damaged by acid rain at Chongqing,
China WANG Yihao, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1842)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Thermal environment effect of urban water landscape YUE Wenze, XU Lihua (1852)
Landscape ecological security pattern associated with the introduction of exotic tree species *Eucalyptus*
..... ZHAO Xiaoqing, HE Chunlan (1860)
Ecological balance between supply and demand in Chongqing City based on cultivated land ecological footprint method
..... SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1872)
Effect of elevated CO₂ on methanotrophs in the rhizosphere of rice plant YAN Chen, XU Jing, ZHONG Wenhui, et al (1881)

Resource and Industrial Ecology

- The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model KE Lina, WANG Quanming, SUN Xinguo, et al (1889)
- An in situ* study on biodeposition of ascidian (*Styela plicata*) in a subtropical aquaculture bay, southern China YAN Jiaguo, QI Zhanhui, TIAN Ziyang, et al (1900)
- Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau ZHANG Lina, LI Jun, FAN Peng, et al (1907)
- Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields ZHANG Dingchen, CAI Dianxiong, DAI Kuai, et al (1916)
- Photosynthetic characteristics of soybean and salvia in an agroforestry system in the Hilly Region, Shangluo, China PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (1926)
- Regulation of exogenous brassinosteroid on growth and photosynthesis of *Helianthus tuberosus* seedlings and cadmium biological enrichment under cadmium stress GAO Huiling, LIU Jinlong, ZHENG Qingsong, et al (1935)
- Calibration coefficients of Granier original formula based on sap flow of *Platycladus orientalis* LIU Qingxin, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (1944)

Research Notes

- An evaluation index system classifying the conservation value of wetland nature reserves based on AHP SUN Rui, CUI Guofa, LEI Ting, et al (1952)
- Root biomass and its distribution of *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* plantations in the Dry-hot Valley GAO Chengjie, TANG Guoyong, LI Kun, et al (1964)
- Physiological response of *Vitex trifolia* to sand burial in the sand coast ... ZHOU Ruilian, WANG Jin, YANG Shuqin, et al (1973)
- Soil fertility under different forest types in the Helan and Liupan Mountain ranges of Ningxia Province JIANG Lin, GENG Zengchao, ZHANG Wen, et al (1982)

Opinions

- Dynamic of litterfall in ten typical community types of Xiaoxing'an Mountain, China HOU Lingling, MAO Zijun, SUN Tao, et al (1994)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大16开本,300页,国内定价90元/册,全年定价2160元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路18号 电话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段靖

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第6期 (2013年3月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 6 (March, 2013)

编辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路18号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路18号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发行	科学出版社 地址:东黄城根北街16号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京399信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营	京海工商广字第8013号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元