

# 基于粗糙集的林木水分生理和冠层结构对净光合速率的影响研究

孙同高<sup>1,2</sup>, 李丽冰<sup>1,3</sup>, 张亨<sup>1,4</sup>, 许炼烽<sup>2</sup>, 陈红跃<sup>1\*</sup>

1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州, 510642; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州, 510655;  
3. 广州市从化区城郊街道办事处, 广东 广州, 510900; 4. 广州普邦园林股份有限公司, 广东 广州, 510600

**摘要:** 对广东省中山市 30 个乡土树种的冠层结构、水分生理及光合作用 3 种生态特性指标进行测定分析, 结果表明: 自然饱和亏、净光合速率、蒸腾速率、瞬时水分利用率、叶面积指数和林地透光率均在各树种间存在显著差异 ( $P < 0.01$ )。自然饱和亏上升幅度为 21.23%; 蒸腾速率、瞬时水分利用率和净光合速率三者的变化幅度分别为  $2.35 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $15.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $7.96 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 叶面积指数和透光率二者的变化幅度分别为  $3.57 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$  和 30.69%。自然饱和亏、蒸腾速率、瞬时水分利用率、叶面积指数和林地透光率都对树种净光合速率有较大影响, 重要性分别为 0.23、0.20、0.13、0.06、0.06。基于粗糙集的林木水分生理和冠层结构特性指标对净光合速率的综合影响力得分排序为合果木 (*Paramichelia baillonii*) > 铁刀木 (*Cassia siamea*) > 黄桐 (*Endospermum chinense*) > 观光木 (*Michelia odora*) > 山杜英 (*Elaeocarpus sylvestris*) > 大叶木莲 (*Manglietia megphylla*) > 双翼豆 (*Peltophorum pterocarpum*) > 黄樟 (*Cinnamomum porrectum*) > 苦梓含笑 (*Michelia balansae*) > 宝华玉兰 (*Magnolia zenii*) > 红花玉兰 (*Magnolia wufengensis*) > 铁冬青 (*Ilex rotunda*) > 竹节树 (*Carallia brachiata*) > 云南拟单性木兰 (*Parakmeria yunnanensis*) > 火力楠 (*Michelia macclurei*) > 五月茶 (*Antidesma bunius*) > 显脉杜英 (*Elaeocarpus dubius*) > 白兰 (*Michelia alba*) > 天竺桂 (*Cinnamomum japonicum*) > 乐昌含笑 (*Michelia chapensis*) > 黄兰 (*Michelia champaca*) > 红花玉蕊 (*Barringtonia racemosa*) > 亮叶含笑 (*Michelia fulgens*) > 鱼木 (*Crateva formosensis*) > 二乔木兰 (*Magnolia soulangeana*) > 水翁 (*Cleistocalyx perculatus*) > 海南木莲 (*Manglietia hainanensis*) > 灰绒含笑 (*Michelia foveolata*) > 深山含笑 (*Michelia maudiae*) > 乐东拟单性木兰 (*Parakmeria lotungensis*)。

**关键词:** 水分生理; 光合作用特性; 冠层结构; 粗糙集

**DOI:** 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.010

**中图分类号:** Q945.79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-5906 (2015) 07-1137-06

**引用格式:** 孙同高, 李丽冰, 张亨, 许炼烽, 陈红跃. 基于粗糙集的林木水分生理和冠层结构对净光合速率的影响研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1137-1142.

SUN Tonggao, LI Libing, ZHANG Heng, XU Lianfeng, CHEN Hongyue. Study on the Effects of Tree Moisture Physiology and Canopy Structure on Net Photosynthesis Photosynthetic Rate Based on the Rough Set Theory [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(7): 1137-1142.

水分对植物的生长具有重要影响, 各国专家都在开展水分生理指标的测定, 并依此进行树种评价和筛选 (宋丽华等, 2009; 张和喜等, 2013; 何丹丹等, 2014)。林木冠层是林木与外界环境最相关的部分 (郑元等, 2010), 是光合作用发生的主要场所, 是森林生产力的基础 (钟泳林等, 2014)。因此, 合理的水分、冠层结构对林木的光合作用有及其重要的影响, 在提高生物量生产方面具有重要作用。

粗糙集理论 (Rough Set) 是在 1982 年由波兰数学家 Pawlak (1982) 提出的。作为客观赋权法的一种, 粗糙集理论在保持不变的分类能力的前提

下, 通过将知识约简 (Kang et al., 2013), 从而得到相应问题的分类规则与决策规则 (王国胤等, 2009; Yan et al., 2014)。目前, 基于粗糙集理论的研究应用于多个方面, 包括计算机领域 (Zhang et al., 2013)、电力领域 (束洪春等, 2004) 和矿产领域 (邵良杉, 2009; 蒋复量等, 2009) 等, 但是基于粗糙集理论对乡土树种评价的领域几乎是空白。净光合速率是非常重要的光合效率指标, 是反映光合功能状况的基本参数 (裴斌等, 2013), 反映了光合作用全过程的效率 (呼和牧仁等, 2009), 因此, 可以将林木其他类型的指标转化为对其净光合速率的影响, 这样可以更合理, 更客观的表达林

**基金项目:** 广东省林业科技创新项目 (2014KJXC015); 中山市科技基金资助项目 (4400-H13527)

**作者简介:** 孙同高 (1990 年生), 男, 硕士研究生, 主要从事森林培育研究。E-mail: stonggao@163.com

\*通信作者: 陈红跃 (1964 年生), 男, 教授, 博士, 主要从事森林培育研究。E-mail: chenhongyuetz@126.com

**收稿日期:** 2015-06-09

木生产力的状况(熊彩云等, 2012), 建立树种评价和筛选的体系。

基于粗糙集的生态特性评价首先需要获得权重的分配, 但权重确定往往难以把握(王广月等, 2009), 常见的层次分析法、德尔菲法等, 通常以决策者的先验知识为基础, 主观因素较大(姜长虹等, 2008); 而粗糙集可以通过分析剩余知识的重要程度, 较为客观地求出权重分配(柳炳祥等, 2007)。本研究通过测定30个乡土树种的冠层结构、水分生理及光合作用指标, 包括自然饱和亏、蒸腾速率( $T_r$ )、瞬时水分利用率(WUE)、叶面积指数(LAI)、林下透光率和净光合速率( $P_n$ )等, 采用粗糙集理论, 通过多个生态影响因子, 定量讨论各指标对林木净光合速率的影响程度, 为建立一个合理、客观, 又能够全面系统描述中山市绿化树种基本性状的城市绿化乡土树种评价指标体系提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

研究地点为中山市中山树木园(N22°11'~22°47', E113°09'~E113°46'), 全年最热为7月, 日均温度28.4℃; 最冷为1月, 日均温度13.2℃, 年平均降水量为1791.3mm, 属于典型的南亚热带海洋性季风气候。经过漫长的气候变化和风雨侵蚀, 中山市形成了以冲积平原为主, 低山丘陵台地错落其间的水乡地形地貌(林俊新等, 2013)。

### 1.2 试验材料

研究材料为中山市中山树木园内的30个乡土树种, 隶属于10个科, 18个属, 包括: 天竺桂 *Cinnamomum japonicum*、铁冬青 *Ilex rotunda*、山杜英 *Elaeocarpus sylvestris*、黄樟 *Cinnamomum porrectum*、双翼豆 *Peltophorum pterocarpum*、水翁 *Cleistocalyx perculatus*、鱼木 *Crateva formosensis*、竹节树 *Carallia brachiata*、五月茶 *Antidesma bunius*、黄桐 *Endospermum chinense*、大叶木莲 *Manglietia megphylla*、海南木莲 *Manglietia hainanensis*、灰绒含笑 *Michelia foveolata*、白兰 *Michelia alba*、黄兰 *Michelia champaca*、亮叶含笑 *Michelia fulgens*、苦梓含笑 *Michelia balansae*、乐昌含笑 *Michelia chapensis*、二乔木兰 *Magnolia soulangeana*、深山含笑 *Michelia maudiae*、云南拟单性木兰 *Parakmeria yunnanensis*、观光木 *Michelia odora*、红花玉蕊 *Barringtonia racemosa*、红花玉兰 *Magnolia wufengensis*、乐东拟单性木兰 *Parakmeria lotungensis*、合果木 *Paramichelia baillonii*、火力楠 *Michelia macclurei*、宝华玉兰 *Magnolia zenii*、显脉杜英 *Elaeocarpus dubius*、铁刀木 *Cassia siamea*。

## 1.3 试验内容和方法

### 1.3.1 树冠结构测定

利用 WinScanopy 植物冠层分析系统(加拿大)配套的 Nikon Coolpix 4500 数码相机, 外接 Nikkor FC-E8 鱼镜头(180°), 分别在研究样地中拍摄林冠层半球面影像, 每个样地随机选5个点拍照, 并用1600×1200分辨率, 按低压缩比率(1:4)的JPEG图像格式保存图片(区余端等, 2012; 段文标等, 2013)。因为这种设置不会对后续相关参数的分析产生影响, 又不至于使图像文件太大。本研究共采集了30个乡土树种的半球面照片, 用 Gap Light Analyzer Version 2.0 (GLA) 软件对照片进行处理与分析, 得到叶面积指数和林下透光率等指标(胡理乐等, 2009)。

### 1.3.2 叶片自然饱和亏的测定

选择晴或晴间多云的天气, 在13:00—14:00时取各样株3~5片正常无病虫害的功能叶, 取样后及时测定鲜重, 然后带回室内测定烘干恒重(80℃), 确定自然含水率; 再通过饱和含水率确定自然饱和亏(薛敏等, 2011)。叶片自然饱和亏的计算公式如下:

$$\text{自然饱和亏}(\%) = \frac{W_t - W_f}{W_t - W_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $W_t$ —饱和鲜重(g);  $W_f$ —初始鲜重(g);  $W_d$ —干重(g)。

### 1.3.3 瞬时光合特征测定

于2014年6月天气晴朗的上午9:00—11:30时, 每个树种各挑选3株长势相近的样木, 每株选取树冠中部3片当年生成熟叶片进行活体测定, 测定叶片选取的朝向一致, 采用 Li-Cor6400 光合仪测定叶片净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、瞬时水分利用率(WUE)等相关参数(高鹤等, 2010; 张毅龙等, 2014), 光源为仪器的红蓝光, 光照强度800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 测定温度设为35℃, 测定的最小匹配时间为120s, 最大匹配时间为200s。气源为试验区2m以外的空气, 每次记录9个数据(赵曦阳等, 2011)。

### 1.3.4 数据统计分析方法

采用 Microsoft Excel 2003 和 SAS 8.0 对数据进行统计分析(康敏明等, 2006; 廖柏勇等, 2011)。

### 1.3.5 基于粗糙集理论的树种综合评价

本研究设置5个光合特性指标为条件属性因子, 依次为:  $C_1$ (自然饱和亏)、 $C_2$ (蒸腾速率)、 $C_3$ (瞬时水分利用率)、 $C_4$ (叶面积指数)、 $C_5$ (林下透光率); 以净光合速率( $D$ )作为决策属性的一个因子, 分别划分为4个等级, 得到树种各指标知识表达系统。根据粗糙集属性约简原理对知识表达

系统进行约简，得到各条件属性对决策属性的依赖度( $rC_i(D)=|\text{pos}C_i(D)||U|$ )、重要性( $\sigma CD(C_i)=rC(D)-r\{C-C_i\}(D)$ )、客观权重：

$$q_i = \frac{rC(D) - r(C - C_i)(D)}{\sum_{i=1}^n [rC(D) - r(C - C_i)(D)]} \quad (2)$$

最后得出各指标对林木净光合作用的影响力得分值：

$$M = \sum_{i=1}^i q_i \times yC_i \quad (3)$$

$y$  为条件属性的数值 (钟嘉鸣等, 2008; 张乐文等, 2010), 进而为中山地区的城市绿化和造林筛选出生长和适应性均表现优良的乡土树种。

## 2 结果与分析

### 2.1 方差分析

30 个树种的 6 个评价指标如表 1 所示。方差分析表明, 自然饱和亏、净光合速率、蒸腾速率、瞬

时水分利用率、叶面积指数和林下透光率均在各树种间存在显著差异 ( $P < 0.01$ )。各测定指标在树种间的变化幅度各不相同, 自然饱和亏以深山含笑最小, 为 8.08%, 大叶木莲的最大, 为 29.31%, 后者相对提高了 21.23%; 蒸腾速率、瞬时水分利用率和净光合速率三者的变化幅度分别为  $2.35 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $15.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $7.96 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 叶面积指数和透光率二者的变化幅度分别为  $3.57 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$  和 30.69%。

### 2.2 基于粗糙集的生态影响评价

各指标按照表 2 的原则进行划分, 结果如表 3 所示。

根据粗糙集的属性约简原理, 对知识表达系统进行运算处理, 结果如下:

$k=rC(D)=|\text{pos}_C(D)||U|=28/30=0.93$ , 所以  $D$  部分依赖于  $C$  (依赖度为 0.93)。

$$kC_1=r\{C-C_1\}(D)=|\text{pos}\{C-C_1\}(D)||U|=21/30=0.70$$

表 1 树种的评价指标

Table 1 Evaluation parameters of tree species

树种	生态评价指标					
	自然饱和亏 $C_1/\%$	蒸腾速率 $C_2/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	瞬时水分利用率 $C_3/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	叶面积指数 $C_4/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$	林下透光率 $C_5/\%$	净光合速率 $D/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
1 天竺桂	11.80±5.45	0.44±0.18	13.41±5.28	5.06±0.10	3.58±0.75	5.07±0.46
2 铁冬青	17.73±1.97	0.88±0.00	6.56±0.26	3.38±0.02	9.27±0.48	6.25±0.66
3 山杜英	15.31±1.83	1.06±0.10	9.35±0.63	2.92±0.06	12.49±0.58	9.89±0.36
4 黄樟	12.34±8.32	1.53±0.12	6.66±0.22	3.94±0.12	5.45±0.95	10.21±0.44
5 双翼豆	22.41±0.76	0.34±0.05	18.57±7.92	1.66±0.19	31.31±3.96	5.95±1.51
6 水翁	8.53±1.46	0.69±0.13	5.78±1.31	2.47±0.84	18.79±7.50	4.07±0.36
7 鱼木	10.93±1.57	0.97±0.11	4.74±0.58	1.99±0.121	26.83±2.07	4.77±0.34
8 竹节树	14.98±1.66	1.28±0.08	6.87±0.10	3.98±0.51	8.83±3.39	8.82±0.34
9 五月茶	13.64±0.67	1.19±0.08	5.69±0.24	3.47±0.31	6.91±3.03	6.77±0.18
10 黄桐	23.56±4.58	0.74±0.00	11.56±0.02	3.21±0.07	8.81±0.15	8.50±0.01
11 大叶木莲	29.31±6.16	0.76±0.12	6.80±0.30	3.22±0.47	7.78±1.46	5.22±0.88
12 海南木莲	9.40±3.50	0.32±0.07	15.24±3.71	3.19±0.27	9.96±4.81	4.66±0.79
13 灰绒含笑	9.41±1.15	0.37±0.07	12.98±4.82	3.48±0.14	7.10±1.58	4.55±0.73
14 白兰	10.39±1.49	0.70±0.00	6.48±0.00	3.45±0.12	7.28±0.69	4.52±0.01
15 亮叶含笑	13.06±0.86	0.89±0.00	6.94±0.21	3.48±0.12	6.75±0.55	6.20±0.20
16 苦梓含笑	20.70±3.79	0.78±0.07	4.96±1.47	3.05±0.27	10.04±1.74	3.80±0.98
17 乐昌含笑	10.09±1.17	0.69±0.00	7.14±0.16	2.47±0.41	13.84±2.46	4.92±0.09
18 二乔木兰	14.44±0.40	0.92±0.23	3.47±1.13	2.78±0.10	11.09±1.01	2.97±0.17
19 深山含笑	8.08±1.06	0.90±0.08	5.54±0.59	2.80±0.13	13.11±1.92	4.99±0.53
20 黄兰	12.22±0.84	0.84±0.07	6.41±0.36	2.77±0.09	13.09±1.95	5.35±0.39
21 云南拟单性木兰	12.03±1.71	1.24±0.15	5.24±0.82	2.21±0.19	14.40±4.42	6.40±0.25
22 观光木	21.11±0.64	1.02±0.25	4.95±0.93	3.21±0.45	11.35±4.45	4.83±0.43
23 红花玉蕊	11.43±2.67	0.62±0.06	6.45±0.29	4.43±0.05	4.61±0.08	4.16±0.42
24 红花玉兰	18.57±2.33	0.74±0.07	5.92±1.20	2.19±0.08	15.56±0.32	4.32±0.58
25 乐东拟单性木兰	9.42±1.02	0.94±0.09	7.97±0.39	2.71±0.37	11.14±1.92	3.68±0.74
26 合果木	25.98±5.79	1.82±0.31	6.25±1.57	2.36±0.23	15.02±3.00	10.93±0.83
27 火力楠	16.64±4.99	0.66±0.00	5.87±0.04	3.72±0.11	6.94±1.06	3.88±0.04
28 宝华玉兰	20.69±4.23	1.17±0.77	3.69±2.15	1.49±1.02	34.20±17.54	3.06±1.09
29 显脉杜英	10.59±1.85	0.18±0.00	9.18±0.30	3.56±0.46	7.00±2.47	6.30±0.73
30 铁刀木	20.20±2.07	2.67±0.13	4.02±0.20	4.39±0.18	3.51±0.42	10.68±0.26

指标测量重复数  $n=9$

表2 评价因子等级的划分标准  
Table 2 Standard for classifying evaluation factor degrees

评价因子	评分等级			
	1	2	3	4
自然饱和亏 $C_1$	$C_1 < 10$	$10 \leq C_1 < 15$	$15 \leq C_1 < 20$	$20 \leq C_1$
蒸腾速率 $C_2$	$C_2 < 0.5$	$0.5 \leq C_2 < 1$	$1 \leq C_2 < 1.5$	$1.5 \leq C_2$
条件属性 水分利用率 $C_3$	$C_3 < 5$	$5 \leq C_3 < 8$	$8 \leq C_3 < 11$	$11 \leq C_3$
叶面积指数 $C_4$	$C_4 < 2$	$2 \leq C_4 < 3$	$3 \leq C_4 < 4$	$4 \leq C_4$
林下透光率 $C_5$	$C_5 < 7$	$7 \leq C_5 < 11$	$11 \leq C_5 < 15$	$15 \leq C_5$
决策属性 净光合速率 $D$	$D < 4$	$4 \leq D < 6$	$6 \leq D < 8$	$8 \leq D$

表3 树种生态特性知识表达系统  
Table 3 Knowledge representation system for ecological characteristics of tree species

树种	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$D$	树种	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$D$
e1	2	1	4	3	1	2	e16	4	2	1	3	2	1
e2	3	2	2	3	2	3	e17	2	2	2	2	3	2
e3	3	3	3	2	3	4	e18	2	2	1	2	3	1
e4	2	4	2	3	1	4	e19	1	2	2	2	3	2
e5	4	1	4	1	4	2	e20	2	2	2	2	3	2
e6	1	2	2	2	4	2	e21	2	3	2	2	3	3
e7	2	2	1	1	4	2	e22	4	3	1	3	3	2
e8	2	3	2	3	2	4	e23	2	2	2	4	1	2
e9	2	3	2	3	1	3	e24	3	2	2	2	4	2
e10	4	2	4	3	2	4	e25	1	2	2	2	3	3
e11	4	2	2	3	2	2	e26	4	4	2	2	4	4
e12	1	1	4	3	2	2	e27	3	2	2	3	1	1
e13	1	1	4	3	2	2	e28	4	2	1	1	4	1
e14	2	2	2	3	2	2	e29	2	2	3	3	2	3
e15	2	2	2	3	1	3	e30	4	4	1	4	1	4

e1,....., e30 为 30 个试验树种

<0.93, 所以  $D$  部分依赖于  $C_1$  (依赖度为 0.70);

$$k_{C_2=r}\{C-C_2\}(D)=|\text{pos}\{C-C_2\}(D)|/|U|=22/30=0.73$$

<0.93, 所以  $D$  部分依赖于  $C_2$  (依赖度为 0.73);

$$k_{C_3=r}\{C-C_3\}(D)=|\text{pos}\{C-C_3\}(D)|/|U|=24/30=0.80$$

<0.93, 所以  $D$  部分依赖于  $C_3$  (依赖度为 0.80);

$$k_{C_4=r}\{C-C_4\}(D)=|\text{pos}\{C-C_4\}(D)|/|U|=26/30=0.87$$

<0.93, 所以  $D$  部分依赖于  $C_4$  (依赖度为 0.87);

$$k_{C_5=r}\{C-C_5\}(D)=|\text{pos}\{C-C_5\}(D)|/|U|=26/30=0.87$$

<0.93, 所以  $D$  部分依赖于  $C_5$  (依赖度为 0.87);

各条件属性  $C_i$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ ) 关于  $D$  的重要性的计算过程如下:

$$\delta CD(C_1)=rC(D)-r\{C-C_1\}(D)=0.93-0.70=0.23 ;$$

$$\delta CD(C_2)=rC(D)-r\{C-C_2\}(D)=0.93-0.73=0.20;$$

$$\delta CD(C_3)=rC(D)-r\{C-C_3\}(D)=0.93-0.80=0.13 ;$$

$$\delta CD(C_4)=rC(D)-r\{C-C_4\}(D)=0.93-0.87=0.06;$$

$$\delta CD(C_5)=rC(D)-r\{C-C_5\}(D)=0.93-0.87=0.06。$$

由以上结果可知, 光合速率  $D$  对自然饱和亏  $C_1$ 、蒸腾速率  $C_2$ 、瞬时水分利用率  $C_3$ 、叶面积指数  $C_4$ 、林下透光率  $C_5$  均部分依赖,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$  都为  $D$  的重要指标, 重要性分别为 0.23、0.20、0.13、0.06、0.06, 没有任何一个属性为冗余属性, 不可约简删除, 这说明自然饱和亏、蒸腾速率、瞬时水分利用率、叶面积指数和林下透光率都对树木净光合速率有较大影响, 其贡献不可忽略。

根据运算结果, 代入客观权重公式可以计算出各指标的客观权重:  $q_{C_1}=0.34, q_{C_2}=0.29, q_{C_3}=0.19, q_{C_4}=q_{C_5}=0.09$ , 代入综合判定式为:  $M=0.34 \times y_{C_1} + 0.29 \times y_{C_2} + 0.19 \times y_{C_3} + 0.09 \times y_{C_4} + 0.09 \times y_{C_5}$ 。应用综合判定式得到 30 个试验树种的 自然饱和亏  $C_1$ 、蒸腾速率  $C_2$ 、瞬时水分利用率  $C_3$ 、叶面积指数  $C_4$ 、林下透光率  $C_5$ 、净光合速率  $D$  的综合影响力, 并对其排序, 如表 4。

由表 4 可知, 中山市 30 个乡土树种的 自然饱和亏、蒸腾速率、瞬时水分利用率、叶面积指数和林下透光率对净光合速率的综合影响力得分超过

表4 各树种综合得分

Table 4 The comprehensive score of each tree species

树种	编号	综合评分	排名	树种	编号	综合评分	排名
合果木	e26	3.44	1	五月茶	e9	2.29	16
铁刀木	e30	3.16	2	显脉杜英	e29	2.28	17
黄桐	e10	3.15	3	白兰	e14	2.10	18
观光木	e22	2.96	4	天竺桂	e1	2.09	19
山杜英	e3	2.91	5	乐昌含笑	e17	2.09	19
大叶木莲	e11	2.77	6	黄兰	e20	2.09	19
双翼豆	e5	2.67	7	红花玉蕊	e23	2.09	19
黄樟	e4	2.58	8	亮叶含笑	e15	2.00	23
苦梓含笑	e16	2.58	8	鱼木	e7	1.90	24
宝华玉兰	e28	2.58	8	二乔木兰	e18	1.90	24
红花玉兰	e24	2.52	11	水翁	e6	1.84	26
铁冬青	e2	2.43	12	海南木莲	e12	1.84	26
竹节树	e8	2.38	13	灰绒含笑	e13	1.84	26
云南拟单性木兰	e21	2.38	13	深山含笑	e19	1.75	29
火力楠	e27	2.34	15	乐东拟单性木兰	e25	1.75	29

3.0 的只有合果木、铁刀木、黄桐这 3 个树种, 其中合果木得分最高, 达 3.44 分。其余大部分树种的综合影响力得分在 2.0~3.0 分之间, 鱼木、二乔木兰等 7 个树种的综合影响力得分低于 2.0 分, 又以乐东拟单性木兰的综合影响力得分最低, 仅为 1.75。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 讨论

除了本研究中所运用的自然饱和亏、蒸腾速率、瞬时水分利用率、叶面积指数和林下透光率等指标之外, 还有很多评价指标例如植物的抗逆性指标(温阳等, 2006; 冯志坚等, 2014), 观赏价值指标(曾宪锋等, 2009; 童丽丽等, 2010)均可以作为乡土树种选育的评价因子, 这些指标都从一定程度上反应了该树种的优良特性。然而, 不同的评价因子对树种的重要值并不相同, 如何筛选评价指标, 如何确定评价指标的权重尤为重要。树种的评价指标是多样的, 本研究采用自然饱和亏、蒸腾速率、瞬时水分利用率、叶面积指数、林下透光率和净光合速率等指标, 是否能最准确反映树种的特性, 还有待进一步的研究。

#### 3.2 结论

研究表明, 参试的 30 个树种中, 林木水分生理和冠层结构特性指标对净光合速率的综合影响力得分排名最高的 3 个树种, 其单项评价指标的得分也较高, 如综合影响力得分最高的合果木, 其自然饱和亏的数值为 25.98%, 净光合速率为  $10.93 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 均居于 30 个树种的前列; 而合果木的蒸腾速率、叶面积指数、林下透光率、瞬时水分利用率的数值均处于 30 个树种的上游水平。因此, 可以得出林木的自然饱和亏、蒸腾速率、瞬时水分利用率、叶面积指数和林下透光率对净光合速率的综合影响力得分基本和树种的各项评价指标得分基本呈正相关的结论, 净光合速率可以作为评判林木生长的最有效、最直观的指标。

本研究用粗糙集理论得出的林木水分生理和冠层结构对净光合速率的综合影响力得分排名和依据各个单项指标的排名并不相同, 但是总体上跟单项指标的排名呈正相关, 该理论比依赖专家意见进行评价的其它方法(如层次分析法等)更为客观, 用于乡土树种生态特性评价的结果更加真实可靠。

#### 参考文献:

KANG X, LI D, WANG S. et al. 2013. Rough set model based on formal concept analysis [J]. *Information Sciences*, 222(3): 611-625.

PAWLAK Z. 1982. Rough sets [J]. *International Journal of Parallel Programming*, 11(5): 341-356.

YAN L, WANG J, HAO X. et al. 2014. Glacier mapping based on rough set theory in the Manas River watershed [J]. *Advances in Space Research*,

53(7): 1071-1080.

ZHANG H, LEUNG Y, ZHOU L. 2013. Variable-precision-dominance-based rough set approach to interval-valued information systems [J]. *Information Sciences*, 244(7): 75-91.

曾宪锋, 李静玫, 曾庆宜. 2009. 粤东 100 种乡土树种分析评价[J]. *广东园林*, 31(3): 45-50.

段文标, 王丽霞, 陈立新, 等. 2013. 红松阔叶混交林林隙大小及光照对草本植物的影响[J]. *应用生态学报*, 24(3): 614-620.

冯志坚, 应梦云, 肖红. 2014. 广东省樟科树种的园林特性评价[J]. *广东园林*, 36(05): 55-58.

高鹤, 宗俊勤, 陈静波, 等. 2010. 7 种优良观赏草光合生理日变化及光照响应特征研究[J]. *草业学报*, 19(4): 87-93.

何丹丹, 张文革, 郭太君, 等. 2014. 75 种园林树木水分生理特性与抗旱性研究[J]. *湖北农业科学*, 53(01): 116-121.

呼和牧仁, 周梅, 翟洪波, 等. 2009. 影响树木光合作用因素的研究进展 [J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 30(2): 287-291.

胡理乐, 朱教君, 李俊生, 等. 2009. 林窗内光照强度的测量方法[J]. *生态学报*, 29(9): 5056-5065.

姜长虹, 何天荣, 屈玉华, 等. 2008. 基于粗糙集理论的规则权重确定方法[J]. *甘肃联合大学学报(自然科学版)*, 22(6): 35-37.

蒋复量, 周科平, 李书娜, 等. 2009. 基于粗糙集-神经网络的矿山地质环境影响评价模型及应用[J]. *中国安全科学学报*, 19(8): 126-132.

康敏明, 杨海燕, 陈红跃, 等. 2006. 34 种阔叶树种早期生长比较[J]. *广东林业科技*, 22(4): 83-87.

廖柏勇, 刘丽婷, 莫晓勇, 等. 2011. 10 年生粗皮桉种源家系选择分析[J]. *华南农业大学学报*, 32(4): 72-77.

林俊新, 修小娟, 何秀云, 等. 2013. 中山市常绿针叶林与阔叶林群落结构健康研究[J]. *生态环境学报*, 22(6): 961-966.

柳炳祥, 李海林. 2007. 基于模糊粗糙集的因素权重分配方法[J]. *控制与决策*, 22(12): 1437-1440.

裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 2013. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. *生态学报*, 33(5): 1386-1396.

区余端, 苏志尧. 2012. 粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态[J]. *生态学报*, 32(18): 5637-5645.

邵良杉. 2009. 基于粗糙集理论的煤矿瓦斯预测技术[J]. *煤炭学报*, 34(3): 371-375.

束洪春, 孙向飞, 于继来. 2004. 粗糙集理论在电力系统中的应用[J]. *电力系统自动化*, 28(3): 90-95.

宋丽华, 张凯. 2009. 应用 PV 技术评价银川市 7 种针叶绿化树种抗旱性 [J]. *西北农业学报*, 18(2): 225-229.

童丽丽, 吴祝慧, 王哲宇, 等. 2010. 层次分析法与熵技术评价在南京城市绿化生态树种选择中的应用[J]. *东北林业大学学报*, 38(9): 58-61.

王广月, 崔海丽, 李倩. 2009. 基于粗糙集理论的边坡稳定性评价中因素权重确定方法的研究[J]. *岩土力学*, 30(8): 2418-2422.

王国胤, 姚一豫, 于洪. 2009. 粗糙集理论与应用研究综述[J]. *计算机学报*, 32(7): 1229-1246.

温阳, 杨文彬, 阎栓喜, 等. 2006. 8 个乡土树种抗逆性对比研究[J]. *干旱区资源与环境*, 20(4): 204-208.

熊彩云, 曾伟, 肖复明, 等. 2012. 木荷种源间光合作用参数分析[J]. *生态学报*, 32(11): 3628-3631.

薛敏, 张文辉, 杜盛. 2011. 黄土高原刺槐群落优势植物水分生理生态研究[J]. *西北林学院学报*, 26(1): 27-34.

张和喜, 迟道才, 王永涛, 等. 2013. 黔中地区玉米水分生产函数模型适应性评价[J]. *水土保持研究*, 20(3): 176-179.

- 张乐文, 张德永, 邱道宏. 2010. 基于粗糙集的可拓评判在岩爆预测中的应用[J]. 煤炭学报, 35(9): 1461-1465.
- 张毅龙, 张卫强, 甘先华. 2014. 低温胁迫对6种珍贵树种苗木光合荧光特性的影响[J]. 生态环境学报, 23(5): 777-784.
- 赵曦阳, 马开峰, 张明, 等. 2011. 3年生毛白杨无性系光合特性的比较研究[J]. 林业科学研究, 24(3): 370-378.
- 郑元, 赵忠, 周慧, 等. 2010. 刺槐树冠光合作用的空间异质性[J]. 生态学报, 30(23): 6399-6408.
- 钟嘉鸣, 李订芳. 2008. 基于粗糙集理论的属性权重确定最优化方法研究[J]. 计算机工程与应用, 44(20): 51-53.
- 钟泳林, 王志云, 洗丽铨, 等. 2014. 基于粗糙集的林木冠层结构和光分布对净光合速率影响研究[J]. 中南林业科技大学学报, 34(4): 43-49.

## Study on the Effects of Tree Moisture Physiology and Canopy Structure on Net Photosynthesis Photosynthetic Rate Based on the Rough Set Theory

SUN Tonggao<sup>1,2</sup>, LI Libing<sup>1,3</sup>, ZHANG Heng<sup>1,4</sup>, XU Lianfeng<sup>2</sup>, CHEN Hongyue<sup>1\*</sup>

1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510650, China;

3. Chengjiao Sub-district Office in Conghua District, Guangzhou 510900, China;

4. Pubang Landscape Architecture Co., Ltd., Guangzhou 510600, China

**Abstract:** Data of ecological characteristics including the photosynthesis, canopy structure and water physiological of 30 native species in Zhongshan city of Guangdong province were collected and compared in this study and a comprehensive evaluation was carried out with variance analysis and rough set theory. The results indicated that there were significant differences of natural saturation deficit, net photosynthetic rate, transpiration rate, instantaneous water use efficiency, leaf area index and transmittance among different tree species ( $P < 0.01$ ). Natural saturation deficit increased by 21.23%; Transpiration rate, instantaneous water use efficiency and net photosynthetic rate increased by  $2.35 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $15.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  and  $7.96 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; Leaf area index and transmittance increased by  $3.57 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$  and 30.69%. Natural saturation deficiency, transpiration rate, instantaneous water use rate, leaf area index and understory light transmittance showed great influence on net photosynthetic rate with the importance of 0.23, 0.20, 0.13, 0.06 and 0.06. Based on the rough set theory, comprehensive influence score of moisture physiology and canopy structure on net photosynthesis photosynthetic rate ranked from high to low were *Paramichelia baillonii* > *Cassia siamea* > *Endospermum chinense* > *Michelia odora* > *Elaeocarpus sylvestris* > *Manglietia egphylla* > *Peltophorum pterocarpum* > *Cinnamomum porrectum* > *Michelia balansae* > *Magnolia zenii* > *Magnolia wufengensis* > *Ilex rotunda* > *Carallia brachiata* > *Parakmeria yunnanensis* > *Michelia macclurei* > *Antidesma bunius* > *Elaeocarpus dubius* > *Michelia alba* > *Cinnamomum japonicum* > *Michelia chapensis* > *Michelia champaca* > *Barringtonia racemosa* > *Michelia fulgens* > *Crateva formosensis* > *Magnolia soulangeana* > *Cleistocalyx perculatus* > *Manglietia hainanensis* > *Michelia foveolata* > *Michelia maudiae* > *Parakmeria lotungensis*.

**Key words:** water physiology; photosynthetic characteristics; canopy structure; rough set