

室内垂直绿化植物生态效益研究

莫惠芝, 罗旭荣, 张静, 赵亮, 许建新* (深圳市铁汉生态环境股份有限公司, 广东深圳 518026)

摘要 [目的]了解垂直绿化植物改善室内环境的能力。[方法]对绿萝、红钻、银皇后、紫边碧玉、白蝴蝶、红掌6种室内垂直绿化植物进行了固碳释氧、降温增湿和滞尘效益的定量分析及综合评价。[结果]垂直绿化植物对室内环境的改善效果显著,不同植物的生态指标效益不同。植物单位绿化面积固碳释氧效益以绿萝最佳,单位绿化面积日固碳量为 $5.48 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,单位绿化面积日释氧量为 $3.98 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;降温增湿效益以红钻最佳,单位面积日增湿量为 $581.34 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,单位绿化面积日降温量 $1415.85 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,并可降低温度 $0.12 \text{ }^\circ\text{C}$;滞尘效益以红掌最佳,单位面积日滞尘量为 $0.0100 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,单位面积年滞尘量 $3.64 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。[结论]6种植物单位绿化面积的综合效益从大到小依次为银皇后、绿萝、红钻、红掌、紫边碧玉、白蝴蝶。垂直绿化的建设不能只追求景观效果而忽略植物的生态价值,应多选择生态效益综合评价较好的植物,以较好地改善室内环境质量。

关键词 室内垂直绿化;生态效益;固碳释氧;降温增湿;滞尘

中图分类号 X173 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2016)36-0089-06

Study on Ecological Effects of Indoor Vertical Greening Plants

MO Hui-zhi, LUO Xu-rong, ZHANG Jing, XU Jian-xin* et al (Shenzhen Techand Ecology & Environment Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518026)

Abstract [Objective] To investigate the ability of vertical greening plants on improving indoor environment. [Method] The efficiency of carbon sequestration, oxygen release, cooling, humidification and dust-retention of 6 indoor vertical greening plant species (including A. 'Sliver Queen', *E. aureum* 'Virens', *P. mandaiianun* 'Royal Queen', *A. andraeanum*, *P. Tetraphylla*, *S. podophyllum* 'White Butterfly') was quantitatively measured and comprehensively evaluated. [Result] The results suggested that all the vertical greening plants showed significantly improvements on indoor environment quality, with various effects by different plants. *E. aureum* 'Virens' was the best plant species of carbon sequestration and oxygen release per unit of plant green area, which absorbed $5.48 \text{ g}/\text{CO}_2$ and released 3.98 g O_2 every daytime. While *P. mandaiianun* 'Royal Queen', released 581.34 g water vapor and absorbed 1415.85 kJ heat every daytime per unit of green area, as well as reducing temperature of $0.12 \text{ }^\circ\text{C}$, was the best plant with cooling and humidification capabilities. *A. andraeanum* had the best capability of daily dust-retention per unit of green area, which retained 0.0100 g dust daily and 3.6400 g annually. [Conclusion] The ranking of comprehensive ecological effect of the 6 vertical greening plants per unit of green area was A. 'Sliver Queen', *E. aureum* 'Virens', *P. mandaiianun* 'Royal Queen', *A. andraeanum*, *P. Tetraphylla*, *S. podophyllum* 'White Butterfly'. This study implies building vertical greening system should consider the integrated ecological effect instead of purely landscape effect.

Key words Indoor vertical greening; Ecological effects; Carbon sequestration and oxygen release; Cooling and humidification; Dust-retention

室内环境是人类生存和活动的重要场所,国内外研究表明,现代人80%~90%的时间在室内度过^[1-2]。然而,由于人口密集及各种装修设施中有害气体的挥发,加上室内空气流通性较差,室内空气污染相当严重。欧盟联合研究中心^[3]研究表明,室内空气污染对人类的危害比室外空气污染更严重。室内环境质量与人们的健康密切相关,改善室内空气质量一直是人们高度重视的焦点^[4-5]。改善室内空气质量的方法很多,但人们更偏向于利用植物来改善室内空气质量。研究表明,植物对改善空气质量效果显著^[6-8]。盆栽植物除了可以美化室内环境外,还能起到改善环境质量的作用,然而单株植物的生态功能有限,大量盆栽植物会占用较大空间。

垂直绿化是城市绿化的重要形式,它既节省了城市用地,又可增加城市绿化面积,在美化城市景观的同时,还具有较好的生态效益。垂直绿化分为室外垂直绿化和室内垂直绿化,较多研究表明,室外垂直绿化具有较好的生态效益^[9-11],而对于室内垂直绿化的生态效益研究鲜见报道。笔

者对室内垂直绿化植物进行了固碳释氧、降温增湿、滞尘等生态效益指标的定量分析与综合评价,研究垂直绿化植物在室内环境的生态效益,旨在为室内垂直绿化的建设与植物的配置提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象 以深圳市铁汉生态环境股份有限公司办公室内的垂直绿墙为研究对象,该室内绿墙建成时间超过1年,植物生长良好,扎根牢固,共用6种植物,除紫边碧玉为胡椒科植物外,其余5种均为天南星科植物(表1)。绿墙长9m,宽6m,使用毛毡式工艺,备有自动淋水系统及灯光控制系统。淋水时间为30min/d,使用照明工具为疝气灯,开灯时间为8:30—18:00,共9.5h。室内温度为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度65%。

表1 室内垂直绿墙植物

Table 1 Indoor vertical green wall plant

编号 No.	种名 Species	科名 Families	学名 Scientific name
1	白蝴蝶	天南星科	<i>Syngonium podophyllum</i> 'White Butterfly'
2	红掌	天南星科	<i>Anthurium andraeanum</i>
3	红钻	天南星科	<i>Philodendron mandaiianun</i> 'Royal Queen'
4	绿萝	天南星科	<i>Epipremnum aureum</i> 'Virens'
5	银皇后	天南星科	<i>Aglaonema</i> 'Sliver Queen'
6	紫边碧玉	胡椒科	<i>Peperomia tetraphylla</i>

基金项目 铁汉生态院士工作站建设项目(2015B090904008);广东省软科学研究计划项目(2014B090903015);2015年度省级产业技术研究与开发专项(粤发改高技术【2015】162号)。

作者简介 莫惠芝(1987-),女,广东东莞人,工程师,硕士,从事立体绿化生态效益研究。*通讯作者,高级工程师,博士,从事植物生态学研究。

收稿日期 2016-11-04

1.2 研究方法

1.2.1 植物叶面积指数测定。对每种植物随机选取 20 片叶片,使用便携式叶面积测定仪测量每枚叶片的面积,通过计算求出平均叶面积(s)。使用边长为 0.4 m 的方形框放置于每种植物的绿化面上,统计框内叶片数量(C)。框内叶片总面积 $S = s \cdot C$,叶面积指数 $R = S/0.4^2$ 。

1.2.2 植物固碳释氧、降温增湿效益日变化测定。对每种植物随机选取 5 株,在每株植物的第 3 位至第 4 位功能叶间选取 1 枚叶片,使用 Li-6400 便携式光合系统分析仪在开放气路下使用自然光源叶室,测定光照强度下叶片的净光合速率(P_n)和蒸腾速率(Tr)。每片叶子测定 1 次,取 5 个瞬时光合速率值作为重复。由于室内绿墙的开灯时间为 8:30—18:00,为给植物适当的适应光照时间,植物的测定在 9:00 开始,每隔 2 h 测定 1 次,共 5 次,测定时间分别为 9:00、11:00、13:00、15:00、17:00。生态效益计算参考刘立光等^[9]的方法,并根据实际情况进行适当修改,具体如下:

(1) 固碳释氧量计算。

$$P = \sum_{i=1}^j [(P_{i+1} + P_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3\ 600 / 1\ 000] + P_1 \times 1\ 800 / 1\ 000 + P_5 \times 3\ 600 / 1\ 000$$

$$W_{CO_2} = P \times 44 / 1\ 000$$

$$W_{O_2} = P \times 32 / 1\ 000$$

$$Q_{CO_2} = R \cdot W_{CO_2}$$

$$Q_{O_2} = R \cdot W_{O_2}$$

式中, P 为植物的日同化总量, $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; P_i 为初测点的瞬时光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; P_{i+1} 为 $i+1$ 时刻的瞬时光合速率; t_i 为初测点的瞬时时间, h ; t_{i+1} 为 $i+1$ 测点的时间, h ; j 为测定次数; $P_1 \times 1\ 800 / 1\ 000$ 为 8:30—9:00 的同化量, $P_5 \times 3\ 600 / 1\ 000$ 为 17:00—18:00 的同化量; W_{CO_2} 和 W_{O_2} 分别为植物单位叶面积的日固碳量和日释氧量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 44 为 CO_2 的摩尔质量; 32 为 O_2 的摩尔质量; Q_{CO_2} 和 Q_{O_2} 分别为植物单位绿化面积的日固碳量和日释氧量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; R 为叶面积指数。

(2) 蒸腾吸热量计算。

$$E = \sum_{i=1}^j [(e_i + e_{i+1}) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3\ 600 / 1\ 000] + e_1 \times 1\ 800 / 1\ 000 + e_5 \times 3\ 600 / 1\ 000$$

$$W_{H_2O} = E / 18$$

$$L = W_{H_2O} \cdot l$$

$$Q_{H_2O} = R \cdot W_{H_2O}$$

$$Q = R \cdot L$$

式中, E 为单位叶面积日蒸腾总量, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; e_i 为初测点瞬时蒸腾速率, $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; e_{i+1} 为下一测点的瞬时蒸腾速率; t_i 为初测点时间, h ; t_{i+1} 为下一测点的时间, h ; j 为测试次数; $e_1 \times 1\ 800 / 1\ 000$ 为 8:30—9:00 的蒸腾量, $e_5 \times 3\ 600 / 1\ 000$ 为 17:00—18:00 的蒸腾量; W_{H_2O} 为植物单位叶面积的日增湿量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 18 为 H_2O 的摩尔质量; L 为植物单位叶面积的日吸热量, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; l 为蒸发耗热系数 ($l = 24\ 95 - 2.38 \times t$, t 为测定日的温度); Q_{H_2O} 为植物单位绿化面积的日增湿量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; Q 为单位绿化面积的日吸热量,

$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; R 为植物的叶面积指数。

(3) 蒸腾降温作用计算。参考张艳丽等^[12]的方法,取底面积为 $10\ \text{m}^2$ 、高度为 $100\ \text{m}$ 的空气柱作为计算单元。在该空气柱体中,因植物蒸腾消耗热量(F)是取自于周围 $1\ 000\ \text{m}^3$ 的空气柱体,故使气柱温度下降。气温下降值用下式表示:

$$\Delta T = F / pc$$

式中, F 为绿化面积植物蒸腾作用下单位体积空气损失的热量, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$,该研究中 $F = Q / 9.5$, Q 为植物单位绿化面积的日吸热量; pc 为空气的容积热容量 [$1\ 256\ \text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$]。

1.2.3 滞尘效益测定。对每种植物随机选取 30 枚叶片,用蒸馏水冲洗干净,并悬挂标签牌做记号。1 个月后,用蒸馏水小心清洗标注叶片,将清洗液装于 1 L 蓝盖试剂瓶中,运回实验室进行滞尘量检测,每种植物 10 片叶子,3 次重复。将清洗干净的叶片用吸水纸擦干,用便携式叶面积测量仪测量叶面积(S)。

将微孔滤膜($\Phi\ 0.45\ \mu\text{m}$)置于 $50\ ^\circ\text{C}$ 烘箱中烘 8 h,取出后在温度为 $27\ ^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 65% 的室内环境放置 2 h 后称取质量 M_1 ,然后置于抽真空过滤仪中过滤清洗液,将过滤出的尘埃及微孔滤膜同样置于 $50\ ^\circ\text{C}$ 烘箱中烘 8 h,烘至恒重,在相同条件下称取质量 M_2 。尘埃质量 $M = M_2 - M_1$,并计算植物单位叶面积的滞尘效益 $D(\text{g}/\text{m}^2) = M/S$ 和单位绿化面积的滞尘效益 $K(\text{g}/\text{m}^2) = M/S \cdot R$ 。

1.2.4 生态效益综合评分。为使评价体系充分体现各种植物的综合生态效益,对上述生态效益进行量化处理后,参考黎国健等^[13]的“标准分”方法对各垂直绿化植物进行综合评定。标准差(V)、标准分(Z)分别为

$$V = \sqrt{\sum (X - \bar{x})^2 / N}$$

$$Z = (X - \bar{x}) / S$$

式中, X 为个体生态效益具体量化数值; \bar{x} 为生态效益量化平均值; N 为个体数量。为避免负值及 0 的出现,选择 50 分为平均值(基础分),以 100 分制对 Z 进行转换,则 $T = 50 + 10Z$, T 为转换值,满分为 100 分。

1.3 数据统计 使用 Excel 2013 进行试验数据的统计分析及图表制作,用 SPSS 19.0 中的单因素方差分析(One-way ANOVA),通过 Post-Hoc 多重比较 Tukey 检验进行植物种间差异性分析。

2 结果与分析

2.1 固碳释氧效益 一般情况下,室内环境的光照强度低于室外,对垂直绿墙光照强度的测定结果表明,绿墙上的光照分布不均匀,光照强度为 $10 \sim 110\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ PAR。由于室内灯光的光强恒定,影响植物光合效率日变化的因素主要是植物自身的生理特性。从图 1 可见,6 种植物在室内的光合效率均不高,光合效率低于 $3.00\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。9:00 时,绿萝、紫边碧玉和白蝴蝶的光合效率较低,为 $0.95 \sim 1.25\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,之后光合效率逐渐提高,13:00 达到最高,之后渐渐降低。其中,绿萝的光合效率大于紫边碧玉和白蝴蝶,在 13:00 时达到 $2.98\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。银皇后、红钻和红

掌在 9:00 的光合效率稍高于绿萝、紫边碧玉和白蝴蝶,为 $1.57 \sim 1.71 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在 11:00 的光合效率均低于其第 1 次测定值,之后光合效率值逐渐增大,在 15:00 的光合效率最大,之后渐渐下降。其中银皇后的光合效率大于红钻与红掌,在 15:00 的光合效率为 $2.87 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

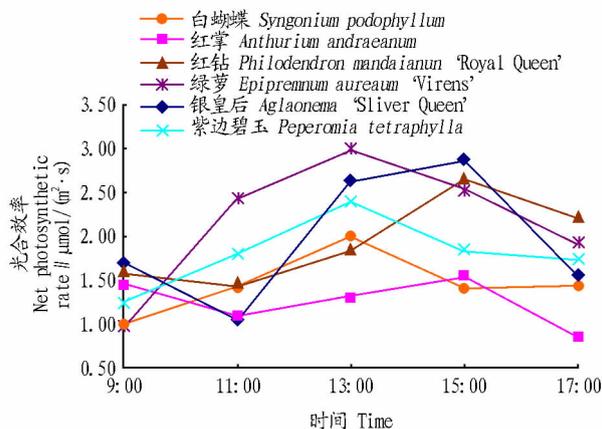


图 1 室内垂直绿化植物的光合效率日变化

Fig. 1 Diurnal variation of photosynthetic efficiency of indoor vertical greening plants

由表 2 可知,垂直绿化植物对室内空气质量有较好的改善作用,不同植物固碳释氧量差异较大。从植物单位叶面积的固碳释氧效益比较,绿萝最佳,其次是红钻,红掌的表现较其他植物差。6 种植物的固碳释氧效益从大到小依次为绿萝、红钻、银皇后、紫边碧玉、白蝴蝶、红掌。叶面积指数是垂直绿化的重要参数,能够反映植物的生长状况。绿萝、银皇后和红钻在毛毡式绿墙的生长状况较好,覆盖率较高,叶面积指数分别为 1.68、1.55 和 1.41,白蝴蝶的叶面积指数最低,仅 0.76。由于叶面积指数的不同,植物绿化面积的固碳释氧效益也不同,从大到小依次为绿萝、红钻、银皇后、紫边碧玉、红掌、白蝴蝶。

2.2 降温增湿效益 从图 2 可见,6 种植物的蒸腾速率随时间的变化而变化,不同植物的蒸腾速率差异明显。白蝴蝶、银皇后和紫边碧玉的蒸腾速率在前 3 次测量中逐渐增大,在 13:00 达到最大值,之后逐渐减小;红钻、红掌和绿萝的蒸腾速率则在 11:00 减小,然后增大,13:00 达到最大值,之后逐渐减小。6 种植物的蒸腾速率以白蝴蝶最大,红掌和绿萝的蒸腾速率较小。由表 3 可知,白蝴蝶的降温增湿效益最佳,显著大于其他植物,其次是红钻,红掌表现最差。6 种植物单位叶面积的日降温增湿效益从大到小依次为白蝴蝶、红钻、

表 2 室内垂直绿化植物固碳释氧量

Table 2 Daily carbon sequestration and oxygen release amount of indoor vertical greening plants

植物 Plants	叶面积指数 Leaf area index	单位叶面积日固碳量 Daily carbon sequestration per unit of leaf area $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	单位叶面积日释氧量 Daily oxygen release amount per unit of leaf area $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	单位绿化面积日固碳量 Daily carbon sequestration per unit of greening area $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	单位绿化面积日释氧量 Daily oxygen release amount per unit of greening area $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
绿萝 <i>Epipremnum aureum</i> 'Virens'	1.68 ± 0.25	3.26 ± 0.40 a	2.37 ± 0.29 a	5.48 ± 0.67 a	3.98 ± 0.49 a
红钻 <i>Philodendron mandainanum</i> 'Royal Queen'	1.41 ± 0.11	3.17 ± 1.03 ab	2.31 ± 0.75 ab	4.47 ± 1.45 a	3.25 ± 1.18 a
银皇后 <i>Aglaonema</i> 'Sliver Queen'	1.55 ± 0.72	2.87 ± 0.26 ab	2.09 ± 0.19 ab	4.45 ± 0.40 a	3.24 ± 0.29 a
紫边碧玉 <i>Peperomia tetraphylla</i>	1.08 ± 0.06	2.55 ± 0.40 abc	1.85 ± 0.29 abc	2.75 ± 0.43 b	2.00 ± 0.31 b
红掌 <i>Anthurium andraeanum</i>	1.06 ± 0.05	1.60 ± 0.53 c	1.16 ± 0.38 c	1.70 ± 0.56 b	1.23 ± 0.40 b
白蝴蝶 <i>Syngonium podophyllum</i>	0.76 ± 0.17	2.07 ± 0.47 bc	1.51 ± 0.34 bc	1.58 ± 0.36 b	1.15 ± 0.26 b

注: 同列不同小写字母表示数值间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercases in the same column stand for significant difference ($P < 0.05$).

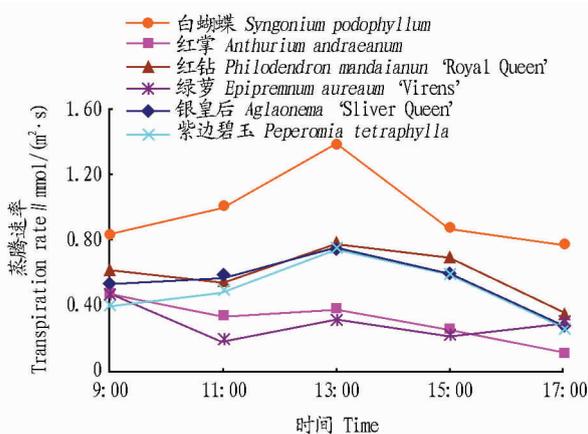


图 2 室内垂直绿化植物的蒸腾速率日变化

Fig. 2 Daily change of transpiration rate of indoor vertical greening plants

银皇后、紫边碧玉、绿萝、红掌。植物单位绿化面积的降温增湿效益从大到小依次为红钻、银皇后、白蝴蝶、紫边碧玉、绿萝、红掌。分别对 6 种植物进行单位绿化面积降温度数计算,结果表明,降温增湿能力最强的红钻可使其周围 1000 m^3 空气降温达到 $0.12 \text{ }^\circ\text{C}$,其次是银皇后,可降温 $0.11 \text{ }^\circ\text{C}$,表现最差的红掌,仅为 $0.04 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.3 滞尘作用 由表 4 可知,单位叶面积的红掌日滞尘量最大,其次为白蝴蝶,红钻最低。6 种植物单位叶面积日滞尘量从大到小依次为红掌、白蝴蝶、紫边碧玉、绿萝、银皇后、红钻,其中红掌显著高于红钻;植物单位绿化面积年滞尘量从大到小依次为红掌、绿萝、银皇后、紫边碧玉、白蝴蝶、红钻,但植物间差异不显著。

2.4 生态效益综合评价 综上,不同植物的生态效益存在较大差异,固碳释氧效益高的植物,降温增湿效益和滞尘效益不一定高,为了筛选生态效益较好的植物,更好地指导垂

直绿化工程的实践应用,对6种植物进行了生态效益的综合评价。考虑到固碳与释氧为同一光合作用系统中的效益,为避免重复计分,只采用释氧效益指标进行评价;而降温与增湿为同一蒸腾作用系统中的效益,因此也只采用增湿效益指

标进行评价。根据表2、3、4的数据分别求得单项指标效益的标准差并进行标准分换算,再以单项指标效益的标准分作为评价因子,进行生态效益的综合评价计算,结果见表5、6。

表3 室内垂直绿化植物降温增湿量

Table 3 Cooling and humidification of indoor vertical greening plants

植物 Plants	单位叶面积 日增湿量 Daily cooling per unit of leaf area g/(m ² ·d)	单位叶面积 日降温量 Daily humidifi- cation per unit of leaf area kJ/(m ² ·d)	单位绿化面 积日增湿量 Daily cooling per unit of greening area g/(m ² ·d)	单位绿化面 积日降温量 Daily humidifi- cation per unit of greening area kJ/(m ² ·d)	单位绿化面 积降温度数 Cooling degree per unit of greening area//°C
	红钻 <i>Philodendron mandaianun</i> 'Royal Queen'	412.30 ± 96.28 b	1 004.15 ± 234.49 b	581.34 ± 135.75 a	1415.85 ± 330.63 a
银皇后 <i>Aglaonema</i> 'Sliver Queen'	337.01 ± 62.38 b	820.78 ± 151.93 b	522.36 ± 96.69 a	1272.21 ± 235.49 a	0.11 a
白蝴蝶 <i>Synгонium podophyllum</i>	579.11 ± 96.32 a	1 410.42 ± 234.60 a	440.12 ± 73.20 ab	1071.92 ± 178.30 ab	0.09 ab
紫边碧玉 <i>Peperomia tetraphylla</i>	299.99 ± 20.26 c	730.62 ± 49.35 c	323.99 ± 21.88 bc	789.07 ± 53.30 bc	0.07 bc
绿萝 <i>Epipremnum aureum</i> 'Virens'	186.05 ± 39.09 c	453.12 ± 95.21 c	312.56 ± 65.67 bc	761.24 ± 159.95 bc	0.06 bc
红掌 <i>Anthurium andraeanum</i>	180.52 ± 44.39 c	439.66 ± 108.11 c	191.35 ± 47.05 c	466.04 ± 114.60 c	0.04 c

注:同列不同小写字母表示数值间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercases in the same column stand for significant difference($P < 0.05$).

表4 室内垂直绿化植物滞尘量

Table 4 Dust-retention of indoor vertical greening plants

植物 Plants	单位叶面积 日滞尘量 Daily dust-retention per unit of leaf area	单位叶面积 年滞尘量 Annual dust- retention per unit of leaf area	单位绿化面 积日滞尘量 Daily dust- retention per unit of greening area	单位绿化面 积年滞尘量 Annual dust- retention per unit of greening area	g/(m ² ·d)
	红掌 <i>Anthurium andraeanum</i>	0.009 4 ± 0.002 5 a	3.43 ± 0.93 a	0.010 0 ± 0.002 7 a	3.64 ± 0.98 a
绿萝 <i>Epipremnum aureum</i> 'Virens'	0.005 2 ± 0.001 9 ab	1.91 ± 0.68 ab	0.008 8 ± 0.003 1 a	3.22 ± 1.15 a	
银皇后 <i>Aglaonema</i> 'Sliver Queen'	0.004 6 ± 0.000 8 ab	1.69 ± 0.29 ab	0.007 2 ± 0.001 2 a	2.62 ± 0.45 a	
紫边碧玉 <i>Peperomia tetraphylla</i>	0.006 1 ± 0.003 0 ab	2.22 ± 1.08 ab	0.006 6 ± 0.003 2 a	2.40 ± 1.17 a	
白蝴蝶 <i>Synгонium podophyllum</i>	0.007 2 ± 0.001 0 ab	2.63 ± 0.35 ab	0.005 5 ± 0.000 7 a	2.00 ± 0.27 a	
红钻 <i>Philodendron mandaianun</i> 'Royal Queen'	0.003 3 ± 0.000 4 b	1.19 ± 0.14 b	0.004 6 ± 0.000 5 a	1.68 ± 0.20 a	

注:同列不同小写字母表示数值间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercases in the same column stand for significant difference($P < 0.05$).

由表5可知,根据植物单位叶面积的释氧效益、增湿效益和滞尘效益进行的综合评价以白蝴蝶的得分最高,得分达到98.89分,红掌最差,得分仅为18.49分。植物单位叶面积的综合生态效益从大到小依次为白蝴蝶、红钻、银皇后、紫边碧玉、绿萝、红掌。由表6可知,虽然单位叶面积

有较高的综合生态效益,但由于其叶面积指数较低,单位绿化面积的生态效益的综合评分较低,仅为19.76分。植物单位绿化面积的综合生态效益从大到小依次为银皇后、绿萝、红钻、红掌、紫边碧玉、白蝴蝶。

表5 垂直绿化植物的单位叶面积生态效益评价综合得分

Table 5 Comprehensive score of ecological benefit evaluation of vertical greening plants per unit of leaf area

植物 Plants	释氧效益 Oxygen release effect		增湿效益 Humidification effect		滞尘效益 Dust-retention effect		综合分数 Comprehensive score		排名 Ranking
	Z	T	Z	T	Z	T	Z	T	
	白蝴蝶 <i>Synгонium podophyllum</i>	-2.09	29.07	4.41	94.06	1.55	65.50	4.89	
红钻 <i>Philodendron mandaianun</i> 'Royal Queen'	2.43	74.32	1.43	64.26	-3.38	16.17	0.60	56.01	2
银皇后 <i>Aglaonema</i> 'Sliver Queen'	1.19	61.88	0.08	50.81	-1.68	33.24	-0.52	44.84	3
紫边碧玉 <i>Peperomia tetraphylla</i>	-0.17	48.30	-0.58	44.19	0.13	51.32	-0.78	42.17	4
绿萝 <i>Epipremnum aureum</i> 'Virens'	2.77	77.71	-2.62	23.84	-0.92	40.77	-0.97	40.28	5
红掌 <i>Anthurium andraeanum</i>	-4.07	9.28	-2.72	22.85	4.30	92.98	-3.15	18.49	6

表 6 单位绿化面积垂直绿化植物的生态效益综合得分

Table 6 Comprehensive score of ecological benefit evaluation of vertical greening plants per unit of greening area

植物 Plants	释氧效益 Oxygen release effect		增湿效益 Humidification effect		滞尘效益 Dust - retention effect		综合分数 Comprehensive score		排名 Ranking
	Z	T	Z	T	Z	T	Z	T	
	银皇后 <i>Aglaonema</i> 'Sliver Queen'	1.73	67.32	2.34	73.39	0.12	51.07	2.91	
绿萝 <i>Epipremnum aureum</i> 'Virens'	3.41	84.14	-1.52	34.78	2.26	72.58	2.89	78.89	2
红钻 <i>Philodendron mandaiianun</i> 'Royal Queen'	1.77	67.71	3.42	84.24	-3.32	16.77	1.30	63.04	3
红掌 <i>Anthurium andraeanum</i>	-2.82	21.76	-3.75	12.47	3.83	88.31	-1.91	30.88	4
紫边碧玉 <i>Peperomia tetraphylla</i>	-1.08	39.17	-1.31	36.88	-0.71	42.86	-2.17	28.35	5
白蝴蝶 <i>Syngonium podophyllum</i>	-3.01	19.90	0.83	58.25	-2.16	28.42	-3.02	19.76	6

3 讨论

3.1 室内垂直绿化植物光合特性 影响植物光合作用的因素较多,光照强度是其中最重要的因素。该研究中 6 种植物的光合效率较低,均低于 $3.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,这与室内光照强度低有关。张永帅等^[14]对绿萝进行了光响应曲线的测量,结果表明,绿萝在较强的光照强度下其光合效率可达到 $6.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而在光照强度低于 $150 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ PAR 时,其光合效率低于 $3.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。该研究中室内的光照强度为 $10 \sim 110 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ PAR,属于低于 $150 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ PAR 范围,植物光合效率也均低于 $3.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,研究结果与之相同。可见,为提高植物的光合效率,使植物生长更好,增强室内光照强度很有必要。

自然条件下,植物光合速率的日变化曲线一般存在单峰和双峰 2 种类型,具单峰型曲线的植物在晴天午时前后光合速率达到顶峰,而具双峰型曲线的植物在中午光合速率下降(曲线的低谷),即出现所谓的“午休”现象^[14]。但光合速率的日变化曲线不是绝对不变的,有些植物因引种到不同地区会改变其日变化曲线类型^[15]。笔者研究结果发现,垂直绿墙应用的 6 种植物在室内环境下,绿萝、紫边碧玉和白蝴蝶为单峰型曲线,峰值出现在 13:00;银皇后、红掌和红钻呈现双峰型曲线,均在 11:00 出现微弱的“光合午休”现象,最大峰值出现在 15:00。由于室内环境的光照条件固定,因此,植物光合效率的变化完全受自身生理特性调控。同时,由于植物在室内环境生长时间较长,其生理特性已逐渐适应了室内环境,因此,相对于室外植物,该研究的 6 种室内植物在不同测量时间点的光合效率差异较小。

植物的蒸腾速率日变化同样存在单峰和双峰 2 种曲线类型,在叶片水分充足时为单峰曲线,在水分缺乏时为双峰曲线^[16-17]。该研究中,白蝴蝶、银皇后和紫边碧玉为单峰曲线,说明这 3 种植物叶片水分充足,对水分要求不高;红掌、红钻和绿萝则呈略微的双峰型,说明这 3 种植物叶片处于轻微的缺水状态,对水分要求稍高。

3.2 室内垂直绿化植物生态效益 固碳释氧、降温增湿、滞尘能力都是评价垂直绿化生态效益的重要指标。然而,这些单项评价指标差异较大,黎国健等^[13]研究指出,固碳释氧能力强的植物,降温增湿能力不一定也强。该研究中,单位叶面积固碳释氧效益最好的是绿萝,降温增湿效益最好的是白

蝴蝶,而滞尘效益最好的是红掌;绿萝的单位绿化面积固碳释氧效益最好,红钻的降温增湿效益最好,红掌的滞尘效益最好。为了更好地指导室内垂直绿化的建设与植物的应用,对垂直绿化植物各生态效益指标的综合比较很有必要,但目前尚无统一的方法对植物各指标进行综合评价。不同评价指标的数值不能笼统相加计算,但其标准分数值具有可加性。笔者参照黎国健等^[13]的“标准分方法”,对 6 种测量植物进行了生态效益综合评价,结果表明,从植物单位叶面积的综合效益比较,白蝴蝶具有较高的综合分数;从植物单位绿化面积的综合效益比较,银皇后具有较高的综合分数。垂直绿化的生态效益追求植物的综合效益,因此,对植物综合生态效益的评价与筛选对垂直绿化的建设具有重要意义。

固碳释氧是植物的一项重要生态服务功能,直接由植物的光合作用决定。该研究植物的光合作用受到室内光强限制,导致植物固碳释氧能力降低。要提高室内垂直绿化植物固碳释氧效益,更好地改善室内空气质量,应增强室内环境光照强度。同时,保证垂直绿化植物水分充足也是提高生态效益的重要措施。

4 结论

建设室内垂直绿化是一项生态工程,对室内环境具有良好的改善作用,不仅能净化空气,还能降温增湿,节省耗电,为人类营造健康的生活环境。笔者测定了 6 种室内垂直绿化植物的生态效益指标,6 种植物的单位绿化面积综合评价从大到小依次为银皇后、绿萝、红钻、红掌、紫边碧玉、白蝴蝶。建设室内垂直绿化不仅是为了营造美丽的室内景观效果,更重要的是改善室内环境质量,因此垂直绿化植物的应用应多选择生态效益综合评价较好的植物。增强室内光照强度,确保植物供水充足,在不影响植物健康生长的前提下,适当增大植物的栽植密度,以更好地发挥室内垂直绿化的生态效益。继续开展室内垂直绿化植物生态效益的测定和定量分析,对丰富植物生态效益数据库及优化室内垂直绿化植物的应用配置具有重要意义。

参考文献

- [1] 陈炜. 室内环境污染与绿色装修[J]. 环境科学与技术, 2001, 24(S2): 56-57.
- [2] HÖPPE P. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort[J]. Energy and buildings, 2002, 34(6): 661-665.
- [3] Commission of the European Communities. Guidelines for ventilation re-

- quirements in buildings: Indoor air quality and its impact on man [M]. Luxembourg: Directorate-General Information Market and Innovation, 1992.
- [4] 高立新, 陆亚俊. 室内空气净化器的现状及改进措施[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(2): 199-201.
- [5] 张显辉, 李长玉. 浅谈室内环境污染问题[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(10): 64-66.
- [6] 余亚白, 陈源, 赖呈纯, 等. 室内空气净化植物的研究与利用现状及应用前景[J]. 福建农业学报, 2006, 21(4): 425-429.
- [7] 曹受金, 潘百红, 田英翠, 等. 6种观赏植物吸收甲醛能力比较研究[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1798-1801.
- [8] 陈小平, 焦奕雯, 斐婷婷, 等. 园林植物吸附细颗粒物(PM_{2.5})效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2558-2566.
- [9] 刘立光, 陈其兵. 成都市四种垂直绿化植物生态学效应研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2004, 25(3): 259-262.
- [10] 官伟, 韩辉, 刘晓东, 等. 哈尔滨市垂直绿化植物降温增湿效应研究[J]. 国土与自然资源研究, 2009(4): 69-70.

- [11] PERINI K, OTTELÉ M, FRAAIJ A L A, et al. Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope[J]. Building and environment, 2011, 46(11): 2287-2294.
- [12] 张艳丽, 费世民, 李智勇, 等. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3878-3887.
- [13] 黎国健, 丁少江, 周旭平. 华南12种垂直绿化植物的生态效益[J]. 华南农业大学学报, 2008, 29(2): 11-15.
- [14] 张永帅, 李海梅. 3种室内观叶植物光合特性研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(3): 222-225.
- [15] 杨甲定, 刘志民. 引种于青藏高原的大田玉米研究: 光合作用日变化的特点[J]. 作物学报, 2002, 28(4): 475-479.
- [16] 陈碧华, 万泉, 李乾振, 等. 尾叶桉组织培养快速繁殖的研究[J]. 福建林业科技, 2002, 29(2): 9-11.
- [17] 陈洪国. 四种常绿植物蒸腾速率、净光合速率的日变化及对环境的影响[J]. 福建林业科技, 2006, 33(1): 76-79.

(上接第88页)

2.5 植株性状与播种量间的相关性 将全试验的播种量与对应植株性状进行相关分析, 结果表明(表6), 有效分枝部位高, 与播种量呈正相关, 株高、根颈粗、主花序长、单株有效

分枝、单株有效角果数、千粒重与播种量均呈负相关, 仅有主花序长与播种量间的相关达显著水平, 其余相关均未达到显著水平。

表6 不同播种量植株性状表现与播种量的相关性

Table 6 Correlation between the sowing amount and the plant performance under different seeding quantities

种植方式 Planting mode	株高 Plant height cm	有效分枝部位 Effective branch height cm	根颈粗 Rhizome diameter mm	主花序长 Main inflore- scence length cm	单株有效分枝数 Effective branch number per plant//个			单株有效角果数 Effective pod number per plant 个	角粒数 Grain number per pod 粒	千粒重 1 000-grain weight g
					一次 The first time	二次 The sec- ond time	合计 Total			
					免耕 No-tillage	160.88	95.75			
翻耕 Ploughing	161.44	96.94	8.35	49.46	3.72	0.063	3.78	134.51	14.49	4.43
<i>r</i>	-0.101 0	0.132 8	-0.325 9	-0.349 4*	-0.235 5	0.046 5	-0.215 8	-0.308 9	-0.010 0	-0.133 2

注: $n=32, r_{0.05}=0.349\ 3, r_{0.01}=0.448\ 7$, *表示显著相关。

Note: $n=32, r_{0.05}=0.349\ 3, r_{0.01}=0.448\ 7$, * indicated significant correlation.

3 结论与讨论

(1) 试验结果表明, 甘蓝型杂交油菜不同栽培方式、不同播种量间的产量无明显差异, 说明翻耕直播栽培并不比免耕直播栽培减少播种量, 虽然产量略有增加, 但是增加的产值不足以弥补翻耕的劳动成本。随着播种量的增加, 油菜的有效分枝部位增高, 株高略有降低, 主花序长变短, 单株有效分枝数和单株有效角果数减少, 千粒重降低, 对主花序长的影响达到显著水平。

(2) 翻耕直播栽培产量高于免耕直播栽培产量, 平均增产5.38%, 增产达显著水平。但是翻耕直播栽培仅比免耕直播栽培产量高88.7 kg/hm², 增产效果和经济效益并不明显。不同播种量间的产量差异不显著, 说明油菜群体自我调节能力较强, 群体小时个体大, 反之亦然, 最终产量差异不明显。这可能与该试验播种量设计较大有关(4.5~15.0 kg/hm²), 因此还有待进一步研究。

(3) 对已有的免耕条件下播种量与产量关系的研究^[1-12]进行统计分析, 结果表明获得最高产量的免耕直播播种量平均为252 g, 平均产量达2 382.2 kg/hm²。结合该试验结果得出免耕直播栽培播种量为3.8~4.5 kg/hm²。

(4) 直播栽培年度间产量差异较大, 与品种、播种期早晚、播时土壤质地、墒情、气候、整个生长期的杂草量均有关。

对已有研究^[1-12]进行统计分析表明, 不同品种、播种量下的平均产量变幅为1 441.7~4 635.9 kg/hm², 平均为2 200.1 kg/hm², 接近2 250.0 kg/hm², 高产可达4 500.0 kg/hm²^[9], 说明直播栽培油菜措施得当可获得高产。

参考文献

- [1] 敖和军, 周桂清, 邹应斌. 杂交油菜免耕直播栽培技术研究初报[J]. 作物研究, 2004, 18(3): 171-172.
- [2] 徐义华. 不同播期和播量对稻田免耕油菜产量及构成因素的影响[J]. 中国农村小康科技, 2007(1): 38-39.
- [3] 施凤雪. 油菜浙油18免耕直播播种量的试验[J]. 浙江农业科学, 2009(1): 115-116.
- [4] 黄海燕, 胡金和, 赵燕, 等. 稻田免耕直播条件下播量对赣油杂1号生长及产量的影响[J]. 河北农业科学, 2009, 13(2): 4-7.
- [5] 袁卫红. 双低油菜“赣两优二号”免耕直播不同播量的研究[J]. 江西农业学报, 2009, 21(4): 28-29.
- [6] 施凤雪, 薛奎, 房玉伟. 播量对油菜浙油杂1号产量及其构成因子的影响[J]. 浙江农业科学, 2012(2): 153-154.
- [7] 李苏明, 胡金和, 骆赞磊, 等. 不同播量对早熟油菜青海131性状及产量的影响[J]. 现代农业科技, 2012(3): 102, 104.
- [8] 范连益, 帅海洪, 陈卫江, 等. 湘东地区不同耕整方式下直播油菜适宜播量研究[J]. 湖南农业科学, 2012(19): 29-33.
- [9] 钟永先, 张莹, 严立. 黔黄油21号直播适宜播量研究[J]. 耕作与栽培, 2015(4): 16, 20.
- [10] 石星华, 寿建尧, 戚航英. 油菜新品种“浙大619”稻板免耕直播栽培最佳播期及播量研究[J]. 上海农业科技, 2015(5): 67, 53.
- [11] 章卓梁, 朱满庭, 华丰, 等. 播量与播种方式对免耕直播油菜产量和抗性的影响[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(1): 20-21.
- [12] 周群喜, 林红梅, 吴和生, 等. 江苏省沿海地区机直播油菜播种量的试验研究[J]. 农业科技通讯, 2016(1): 104-107.