

湿地木本植物冬季固碳释氧与增湿降温能力研究

Study on the Capacity of Carbon Fixation and Oxygen Release, as well as Humidification and Cooling of Wetland Woody Plants in Winter

伍祖莹 王芙蓉 许铭宇* 陈平

WU Zuying, WANG Furong, XU Mingyu*, CHEN Ping

基金项目: 2021年广东省自然资源事务(生态林业建设)专项基金项目(编号: KH2101501)

摘要

通过在冬季对10种华南地区湿地木本植物的基础信息、光合特性参数进行测量和计算,对比分析不同木本植物日固碳释氧与日增湿降温的能力,以期构建高固碳型的湿地生态系统提供参考。结果表明:在冬季,单位叶面积日固碳释氧与增湿降温能力较强的是灰莉 *Fagraea ceilanica*、海桐 *Pittosporum tobira*、悬铃花 *Malvaviscus arboreus*、白背绒香玫 *Arachnothryx leucophylla* 与垂枝红千层 *Melaleuca viminalis*; 单位土地面积日固碳释氧与增湿降温能力较强的是海桐、悬铃花、灰莉与鸳鸯茉莉 *Brunfelsia brasiliensis*。整体上,常绿灌木固碳释氧、增湿降温能力优于常绿乔木,乡土植物优于外来植物。因此,构建高固碳型湿地应以常绿植物与乡土植物为主,采用乔灌草多层次结构配置,依据光照条件精选植物,提升湿地固碳效能,确保碳储存的长期稳定性。

Abstract

The basic plant information and photosynthetic characteristics parameters of 10 wetland woody plants in South China were measured and calculated in winter, and the daily carbon fixation, oxygen release and daily humidification and cooling capabilities of different woody plants were compared and analyzed in order to provide a reference for the construction of high carbon fixation type wetland ecosystem. The results show that: In winter, *Fagraea ceilanica*, *Pittosporum tobira*, *Malvaviscus arboreus*, *Arachnothryx leucophylla* and *Melaleuca viminalis* had the best daily carbon fixation, oxygen release, humidification and cooling capacity per unit leaf area. The best daily carbon fixation, oxygen release, humidification and cooling capacity per unit land area were *Pittosporum tobira*, *Malvaviscus arboreus*, *Fagraea ceilanica* and *Brunfelsia brasiliensis*. On the whole, the capacity of carbon fixation and oxygen release, as well as humidification and cooling of evergreen shrubs was better than that of evergreen trees, and native plants were better than exotic plants. Therefore, the construction of high-carbon wetland should mainly consist of evergreen plants and native plants, adopt multi-level structure configuration of trees, shrubs and grasses, select plants according to light conditions, improve the carbon sequestration efficiency of wetland, and ensure the long-term stability of carbon storage.

文章亮点

1) 实地测量湿地木本植物基础信息,通过测定光合日变化与净光合速率对光的响应曲线数据,计算获得植物冬季日固碳释氧和增湿降温量;2) 对比分析10种华南地区湿地木本植物冬季日固碳释氧和增湿降温能力。

关键词

湿地植物; 木本植物; 光合特性; 固碳释氧; 增湿降温; 华南地区

Keywords

Wetland plant; Woody plant; Photosynthetic characteristic; Carbon fixation and oxygen release; Humidification and Cooling; South China

收稿日期: 2024-04-09

修回日期: 2024-09-10

“十四五”规划蓝图已将“碳达峰”与“碳中和”目标提升至国家层面，我国积极倡导并践行绿色生产生活方式，以应对全球气候变化挑战。湿地作为全球碳库之一，通过植物的光合作用减少大气中二氧化碳含量，具有重要的碳汇作用。同时，湿地承担着缓解城市热岛效应、调节局部气候的重要角色。研究湿地植物的固碳释氧与降温增湿能力，对于提升城市居住环境质量、促进生态文明建设具有深远意义，是推动城市可持续发展的重要力量。

湿地植物在广义上可分为具有水陆两栖生长能力的两栖植物、能生长在中生环境与湿生环境的半湿生植物、需长期生长于湿生环境中的湿生植物，以及生长于水中的水生植物^[1]。长期以来，我国在研究湿地植物方面取得显著进展，涵盖湿地植物的种类多样性^[2-3]、群落结构^[4-5]、水体净化能力^[6-7]、景观构建及应用^[8-9]、低成本养护^[10]等多个方面。针对湿地植物固碳释氧与增湿降温能力的研究，国外多聚焦于比较分析植物不同部位（根、茎、叶）的固碳释氧能力及其环境影响因素^[11-12]；国内则侧重于不同时空尺度与生境变化下植物能力表现的差异性^[13-14]、生态服务价值核算^[15-16]等。在研究对象上，草本植物相关研究数量远比木本植物多；在试验季节选择上，研究多倾向于植物生长旺盛的春、夏季。因此，本文选择在植物生长低谷期的冬季，比较分析湿地木本植物的光合特性，探讨不同植物固碳释氧与增湿降温的能力的差异性，为高固碳效能型湿地景观的选材与配置提供切实可行的参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本次试验地选取位于广州市的中国科学院华南国家植物园（简称HN）与海珠国家湿地公园（简称HZ）。广州地处中国南方丘陵地带，属于亚热带季风气候，冬季温和湿润。广州市2024年1月气候影响评价报告显示，1月全市平均气温为15.9℃，月雨量19.1mm，各区平均气温在14.6~16.6℃^[17]。华南国家植物园是水热条件优越且极具季风常绿阔叶林特色的园区，而海珠国家湿地公园内河涌纵横交错，是湿地资源极其丰富的复合型湿地，两处试验地均为湿地植物提供良好的生长条件。

1.2 植物调查

首先对两处试验地进行湿地木本植物的外业调查，深入了解湿地木本植物种类及其生境特点。为更好地突出木本植物在湿地中生长的特点，研究根据植物与水岸边缘的距离，将木本植物划分为水中栽植型和消落带生长型（与水岸边缘距离不超过1m），记录在此范围内健康生长的木本植物。调查得出华南国家植物园含有28种符合条件的湿地木本植物，隶属于20科27属，常绿树种25种，落叶树种3种，其中乡土树种20种，外来树种8种；海珠国家湿地公园含有44种符合条件的湿地木本植物，隶属于27科38属，常绿树种34种，落叶树种10种，其中乡土树种29种，外来树种15种。调查记录的木本植物均为消落带生长型，其中兼具消落带生长型与水中栽植型2种植物的植物共9种，

主要为落羽杉 *Taxodium distichum* 与池杉 *Taxodium distichum* var. *imbricarium*。

1.3 试验材料

在湿地公园植物调查的基础上，依据中国湿地植物数据库^[18]、《中国常见湿地植物》^[19]《广东湿地植物》^[1]《广西湿地植物》^[20]《广东植物志》^[21]《华南常见景观植物》^[22]等书籍，以及查阅华南地区植物适应性评价^[23]与植物耐水淹筛选^[24-25]等相关文献，结合实地测量的可操作性，选取主要的试验材料，包括华南国家植物园的垂枝红千层 *Melaleuca viminalis*、悬铃花 *Malvaviscus arboreus*、假连翘 *Duranta erecta*、白背绒香玫 *Arachnothryx leucophylla*、椭圆叶木蓝 *Indigofera cassioides*、黄蝉 *Allamanda schottii*、鸳鸯茉莉 *Brunfelsia brasiliensis* 7种植物，与海珠国家湿地公园的海桐 *Pittosporum tobira*、灰莉 *Fagraea ceilanica*、水石榕 *Elaeocarpus hainanensis*、垂枝红千层、白背绒香玫5种植物，并将两园中的相同种类标记为垂枝红千层_{HN}、垂枝红千层_{HZ}、白背绒香玫_{HN}、白背绒香玫_{HZ}，以作区分。另外，选取11种植物测定其净光合速率对光的响应曲线作为扩充论证数据，包括华南国家植物园的蓝花藤 *Petrea volubilis*、小叶紫薇 *Lagerstroemia parviflora*、蝶花荚蒾 *Viburnum hanceanum*、夹竹桃 *Nerium oleander*、龙柏 *Juniperus chinensis* ‘Kaizuca’、落羽杉、鹰爪花 *Artabotrys hexapetalus*，海珠国家湿地公园的假苹婆 *Sterculia lanceolata*、阳桃 *Averrhoa carambola*、朱缨花 *Calliandra haematocephala*、蒲桃 *Syzygium jambos*（表1）。

试验所选植株均为健康、无病虫害且生长环境基本一致的成年植株，并遵循严格的试验材料筛选标准，确保同一试验组所选植株长势与生长年龄相对一致，控制不同植株测量数据间的误差保持在一定限度内，以提高试验数据可靠性。由于两处试验点都种植了垂枝红千层与白背绒香玫，选取不同地点的同种植物进行不同的龄期与生长形态的简单试验对比。在生长年龄、高度及冠幅上，垂枝红千层_{HZ}的数值均显著高于垂枝红千层_{HN}，白背绒香玫_{HN}数值则略高于白背绒香玫_{HZ}。

1.4 试验方法

1.4.1 光合日变化测定

本试验采用美国 LICOR-6800 型便携式光合作用测定系统，试验于2024年1月8日—1月20日天气晴朗、无风或微风时进行，每种植物选取3株健康的植株，再随机选取树木向阳面中部的3片叶片测定指标。从8:00至18:00每隔2h设置1个区间，共5个区间（即8:00—10:00，10:00—12:00，12:00—14:00，14:00—16:00，16:00—18:00），测定湿地木本植物全天各时段瞬时光合指标，包括净光合速率 P_n （单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）、蒸腾速率 T_r （单位为 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）、水分利用效率 WUE ，每个区间测量5次瞬时的光合指标。

1.4.2 净光合速率对光的响应曲线测定

在光合日变化测定方法的基础上，设定测定系统温度

为 $22 \pm 1^\circ\text{C}$, CO_2 浓度设置为 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 应用红蓝光光源提供不同的光合有效辐射强度 (PAR), 梯度设置为 1 800、1 500、1 200、1 000、900、600、300、200、100、70、30 和 $0 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 测定 P_n -PAR 曲线。根据叶子飘^[26]对 4 种常用光响应计算模型 (直线双曲线模型、非直线双曲线模型、指数函数模型与直线双曲线修正模型) 的对比研究, 可知直线双曲线修正模型拟合曲线求出的表观量子效率 AQY 、最大光合值 P_{max} 、光饱和点 LSP 、光补偿点 LCP 、暗呼吸速率 Rd 更为贴近实测值。因此, 本文选用该模型进行相关计算, 确保计算所得数据具备真实有效性和准确性。

1.4.3 固碳释氧量的计算

在植物光合日动态中, 各时间段瞬时净光合速率形成的曲线与时间横轴围合而成的面积, 即为该植物日同化总量, 设为 A , 计算公式为:

$$A = \sum_{i=1}^j [(A_{i+1} + A_i) \div 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3\ 600 \div 1\ 000] \quad (1)$$

式中, 日同化总量 A 的单位为 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; A_i 为初测点的瞬时净光合速率, A_{i+1} 为初测点下一点的瞬时净光合速率, 单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; t_i 为初测点的瞬时时间, t_{i+1} 为初测点下一点的瞬时时间, 单位为 h; j 为测定次数。

通常情况下, 植物夜间的暗呼吸消耗量按照日间同化量的 20% 计算^[27], 据此可算出植物日固碳释氧的总量, 计算公式为:

$$W_{\text{CO}_2} = \frac{44 \times A}{1000} (1 - 20\%) \quad (2)$$

$$W_{\text{O}_2} = \frac{32 \times A}{1000} (1 - 20\%) \quad (3)$$

式中, W_{CO_2} 为日固定二氧化碳的总量, W_{O_2} 为释放氧气的总量, 单位为 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

表 1 试验材料基本情况

Tab.1 Basic information of experimental materials

试验地点	种	科	生活型	来源	湿地植物分类	平均树高 / m	平均冠幅 / m	平均年龄 / 年	生长习性
华南国家植物园 (HN)	垂枝红千层 ^{HN}	桃金娘科	EGT	ITS	两栖植物	1.62	0.25	3~5	喜温暖湿润, 喜阳, 适肥沃酸性土, 尤宜水边栽培
	悬铃花	锦葵科	EGS	ITS	湿生植物	1.84	0.55	5~8	喜高温多湿、喜阳, 适种于湿润的沙质土壤、壤土
	假连翘	马鞭草科	EGS	ITS	半湿生植物	1.89	1.62	5~8	喜温暖、阳光充足且通风的环境, 耐水湿, 不耐涝
	白背绒香玫 ^{HN}	茜草科	EGS	ETS	半湿生植物	1.38	0.83	4~6	喜光, 喜湿润的微酸性土壤
	椭圆叶木蓝	豆科	EGS	ITS	半湿生植物	2.53	1.84	>10	可生长于半湿润的环境, 适应性较强
	黄蝉	夹竹桃科	EGS	ETS	半湿生植物	1.74	2.15	5~8	喜阳, 喜温暖湿润气候, 耐涝
	鸳鸯茉莉	茄科	EGS	ETS	半湿生植物	1.93	2.32	5~8	喜温暖湿润气候, 忌涝, 适生于排水佳的微酸性土壤
	蓝花藤	马鞭草科	EC	ETS	半湿生植物	-	-	4~6	适宜温暖湿润的环境, 需排水条件良好
	小叶紫薇	千屈菜科	DS	ITS	湿生植物	-	-	3~5	喜光, 喜温暖且略有湿气之地
	蝶花菜菔	荚蒾科	EGS	ITS	半湿生植物	-	-	5~8	喜光, 喜温暖湿润, 适应性、抗逆性和耐受性较强
	夹竹桃	夹竹桃科	EGS	ITS	半湿生植物	-	-	4~6	喜温暖湿润环境, 耐水淹, 适生于肥沃的沙壤土
	龙柏	柏科	EGT	ETS	半湿生植物	-	-	4~6	喜光, 适应温暖湿润的气候, 忌积水
	落羽杉	柏科	DT	ITS	两栖植物	-	-	>20	喜生长在平原水网地区, 适应性强, 耐低温干旱涝渍, 耐水湿, 能生于排水不良的沼泽地上
	鹰爪花	番荔枝科	EGS	ITS	半湿生植物	-	-	5~8	喜温暖湿润, 适生于疏松肥沃排水良好的土壤
广州市海珠国家湿地公园 (HZ)	海桐	海桐科	EGS	ITS	半湿生植物	2.67	4.55	5~8	喜阳, 喜温暖湿润环境, 适应性强
	灰莉	龙胆科	EGS	ITS	半湿生植物	2.84	2.57	5~8	喜光、喜温暖湿润环境, 较为耐涝
	水石榕	杜英科	EGT	ITS	湿生植物	7.25	6.89	>10	喜湿耐水, 一般耐水淹
	垂枝红千层 ^{HZ}	桃金娘科	EGT	ITS	两栖植物	8.36	6.04	>10	喜温暖湿润, 喜阳, 适肥沃酸性土, 尤宜水边栽培
	白背绒香玫 ^{HZ}	茜草科	EGS	ETS	半湿生植物	0.48	0.33	3~5	喜光, 喜湿润的微酸性土壤
	假苹婆	锦葵科	EGT	ITS	半湿生植物	-	-	>10	喜阳、喜高温湿润, 在土层深厚湿润、富含有机质的土壤上生长迅速
	阳桃	酢浆草科	EGT	ITS	半湿生植物	-	-	>10	喜高温湿润气候, 忌积水
	朱缨花	豆科	DS	ETS	半湿生植物	-	-	5~8	喜光、喜温暖湿润环境, 喜湿润肥沃土壤, 怕积水
蒲桃	桃金娘科	EGT	ITS	半湿生植物	-	-	>10	喜光耐水湿, 喜暖热气候, 土壤适应广, 以肥沃、深厚和湿润的土壤为最佳	

注: 常绿乔木 (Evergreen Tree, EGT), 落叶乔木 (Deciduous Trees, DT), 常绿灌木 (Evergreen Shrubs, EGS), 落叶灌木 (Deciduous Shrubs, DS), 常绿藤本 (Evergreen Climber, EC), 乡土树种 (Indigenous Tree Species, ITS), 外来树种 (Exotic Tree Species, ETS)。

1.4.4 增湿降温量的计算

在植物光合日动态中,各时间段瞬时蒸腾速率形成的曲线与时间横轴围合而成的面积,即该植物日蒸腾总量 E ,计算公式为:

$$E = \sum_{i=1}^j [(e_{i+1} + e_i) \div 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3600 \div 1000] \quad (4)$$

式中, E 的单位为 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; e_i 为初测点的瞬时蒸腾速率, e_{i+1} 为初测点下一点的瞬时蒸腾速率,单位为 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; t_i 为初测点的瞬时时间, t_{i+1} 初测点下一点的瞬时时间,单位为 h ; j 为测定次数。

将上述计算所得的日蒸腾总量换算为日释放水的总量,即日增湿总量 $W_{\text{H}_2\text{O}}$,公式为:

$$W_{\text{H}_2\text{O}} = E \times 18 \quad (5)$$

式中, $W_{\text{H}_2\text{O}}$ 的单位为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 18 为水的摩尔质量,单位为 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

根据蒸腾吸热的原理,植物的蒸腾作用可使周围的空气柱 ($10 \text{ m}^2 \times 100 \text{ m}$) 温度下降,每平方米叶片蒸发水分而吸收的热量,即日吸收热量 Q ,计算公式为:

$$Q = W_{\text{H}_2\text{O}} \times L \times 4.18 \quad (6)$$

$$L = 597 - 0.57 \times t \quad (7)$$

式中, Q 的单位为 $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, L 为蒸发耗热系数, t 为当日的温度。

根据上述计算,植物蒸腾吸热的气温下降值即日降温量 ΔT ,公式为:

$$\Delta T = Q \div PC \quad (8)$$

式中, ΔT 的单位为 $^{\circ}\text{C}$; PC 为空气容积热容量 (为 $1256 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)。

1.4.5 叶面积指数计算

叶面积指数 LAI (Leaf Area Index) 即植物总叶面积与所覆土地面积之比。因每棵植株形态特征、绿量与理论值具有差异性,不能仅以单位叶面积的固碳量和蒸发量作为判定依据^[17],引入 LAI 值能更准确地表达不同植株的生态效益。单株树木叶片总面积采用 David J. Nowak^[28] 研究建立的城市树木叶面积回归模型进行计算。该模型为综合参考大量树木的树种、年龄、胸径、树高等基本参数的差异性所得,能有效减少误差,其计算公式为:

$$Y = \exp(-4.3309 + 0.2942H + 0.7321D + 5.7217Sh - 0.0148S) + 0.1159 \quad (9)$$

$$S = \pi D(H + D) / 2 \quad (10)$$

式中, Y 为植株总叶面积,单位为 m^2 ; S 为树冠的垂直投影面积, H 为树高, D 为树冠直径,单位为 m ; Sh 为树冠投影系数。树冠投影系数是描述树木冠层对阳光遮挡程度的参数,它反映树木冠层的密度和对光线的拦截能力。 Sh 的值越大,表示树木冠层越密集,对阳光的遮挡越强,因此对周围环境的冷却效果也越好。

通过上述计算公式,可求得叶面积指数 LAI 为:

$$LAI = \frac{Y}{Sh \left(\frac{1}{4} \pi D^2 \right)} \quad (11)$$

根据叶面积指数,可算出单株植物在其所覆盖的土地面积上的日固碳量、日释氧量、日增湿量、日降温量,计算公式为:

$$P_{\text{CO}_2} = LAI \times W_{\text{CO}_2} \quad (12)$$

$$P_{\text{O}_2} = LAI \times W_{\text{O}_2} \quad (13)$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = LAI \times W_{\text{H}_2\text{O}} \quad (14)$$

$$P_{\Delta T} = LAI \times W_{\Delta T} \quad (15)$$

1.4.6 水分利用效率计算

植物水分利用效率为衡量单位时间内光合作用干物质产量与耗水量之比,反映生长过程中能量转化效率,是评估作物产量与用水量关系及水分亏缺条件下植物生长适宜度的关键综合指标。在叶片水平上的,水分利用效率通常定义为植物净光合速率与蒸腾速率的比值,计算公式为:

$$WUE = \frac{P_n}{T_r} \quad (16)$$

本次试验调查记录及数据统计采用 Excel 软件,数据的分析、非线性回归模型的拟合以及图表制作等则采用 SPSS 和 Graphpad Prism 软件。

2 结果与分析

2.1 光合参数的日变化分析

12 个试验植物材料包含 8 种常绿灌木与 2 种常绿乔木,通过不同颜色的折线绘制试验植物光合参数的日变化,区分不同植物的试验地与生长型。

在净光合速率日变化方面,悬铃花、鸳鸯茉莉、白背绒香玫 HN 、黄蝉、海桐的 P_n 曲线呈现单峰型曲线(图 1)。其中,同属于喜阳植物的海桐和悬铃花峰值最高,数值可达 $19.49 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $14.33 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,峰值后曲线逐渐下降。垂枝红千层 HZ 、垂枝红千层 HN 、假连翘、椭圆叶木蓝、白背绒香玫 HZ 、灰莉、水石榕的 P_n 曲线呈双峰型曲线。第一轮峰值在中午 11:00—13:00 出现,第一轮峰值出现 1 h 后发生“光合午休”现象,第二轮峰值在 15:00 左右出现。白背绒香玫在两处试验地所测曲线走势呈现相反的结果,可能是因为 2 个试验日的日照强度日变化差异与植物生长状态不同导致了误差。此外,灰莉和垂枝红千层 HZ 第二轮光合峰值高于首轮,结合同一时期 T_r 、 WUE 数值上升的结果,这可能与午后环境改善导致植物内部水分状况调整有关。按光合作用能力排序,从强到弱依次为海桐、悬铃花、灰莉、白背绒香玫 HZ 、鸳鸯茉莉、白背绒香玫 HN 、假连翘、垂枝红千层 HN 、椭圆叶木蓝、黄蝉、垂枝红千层 HZ 、水石榕。整体来看,常绿乔木净光合速率低于常绿灌木。

在蒸腾速率日变化方面,冬季气温下降,日照时长缩短,植物生理活动减弱,本试验所测蒸腾速率数值不高,普遍在 $0 \sim 4.5 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 波动(图 2)。其中,垂枝红千层 HN 与白背绒香玫 HZ 曲线波动幅度较大,两者蒸腾曲线变化均受环境因素影响:垂枝红千层 HN 晨间蒸腾速率高,随光照增强和温度升高而上升,又因“光合午休”现象而蒸腾速率急剧下降;白背绒香玫 HZ 因云层消散光照增强,蒸腾

速率急升急降以适应强光的变化, 随后稳定下降。按蒸腾作用能力排序, 从强到弱依次为垂枝红千层_{HN}、悬铃花、海桐、灰莉、鸳鸯茉莉、白背绒香玫_{HZ}、白背绒香玫_{HN}、垂枝红千层_{HZ}、椭圆叶木蓝、水石榕、假连翘、黄蝉。常绿灌木和常绿乔木的蒸腾速率无明显差异。

在水分利用效率日变化方面, 影响 *WUE* 的有外部影响因素与内部影响因素, 外部影响因素包括温度、光强、湿度、CO₂ 浓度等, 内部影响因素包括根系生长分布、叶片气孔运行机制、遗传物质基础等^[19]。冬季湿地木本植物的 *WUE*

曲线整体在 0.42~9.11 波动, 曲线呈缓升缓降趋势, 少部分植物在 16:00 左右出现 *WUE* 升高的现象, 如假连翘、鸳鸯茉莉、水石榕。从外部影响因子分析, 傍晚环境光照强度与温度下降, 植物净光合速率与蒸腾速率同步下降, 植物通过关闭气孔减少水分的蒸腾损失, 优化内部的水分利用效率, 导致 *WUE* 值升高。按水分利用能力排序, 从强到弱依次为假连翘、鸳鸯茉莉、黄蝉、白背绒香玫_{HN}、水石榕、椭圆叶木蓝、海桐、悬铃花、灰莉、白背绒香玫_{HZ}、垂枝红千层_{HN}、垂枝红千层_{HZ}。常绿灌木水分利用能力整体优于常

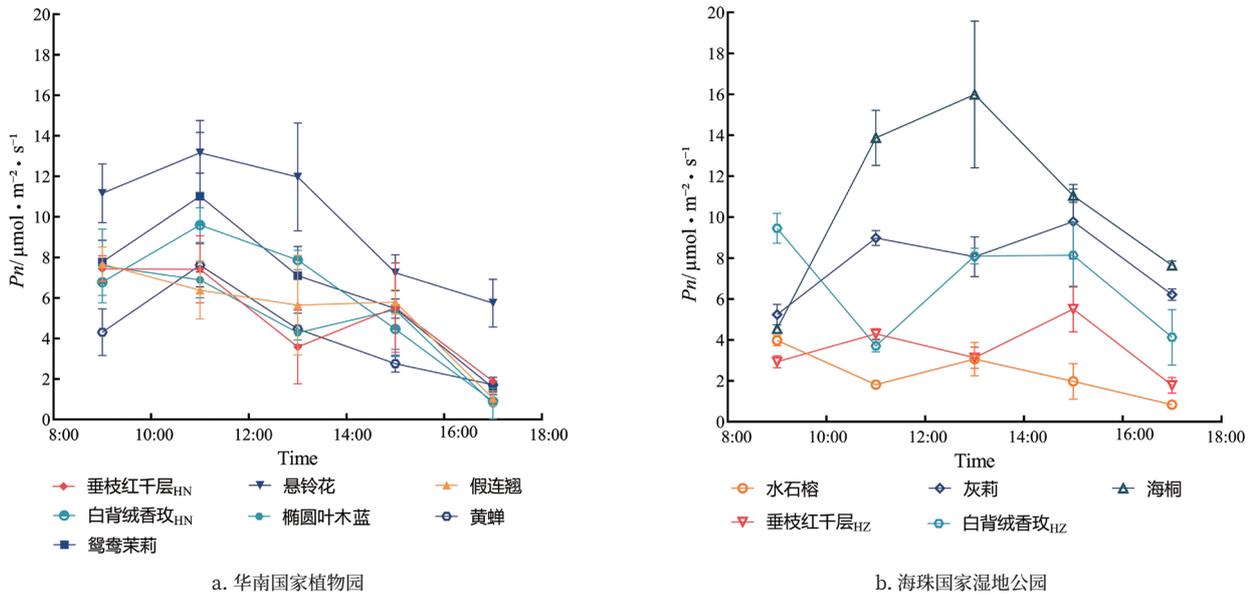


图 1 湿地木本植物净光合速率日变化
Fig.1 Daily variation of net photosynthetic rate of wetland woody plants

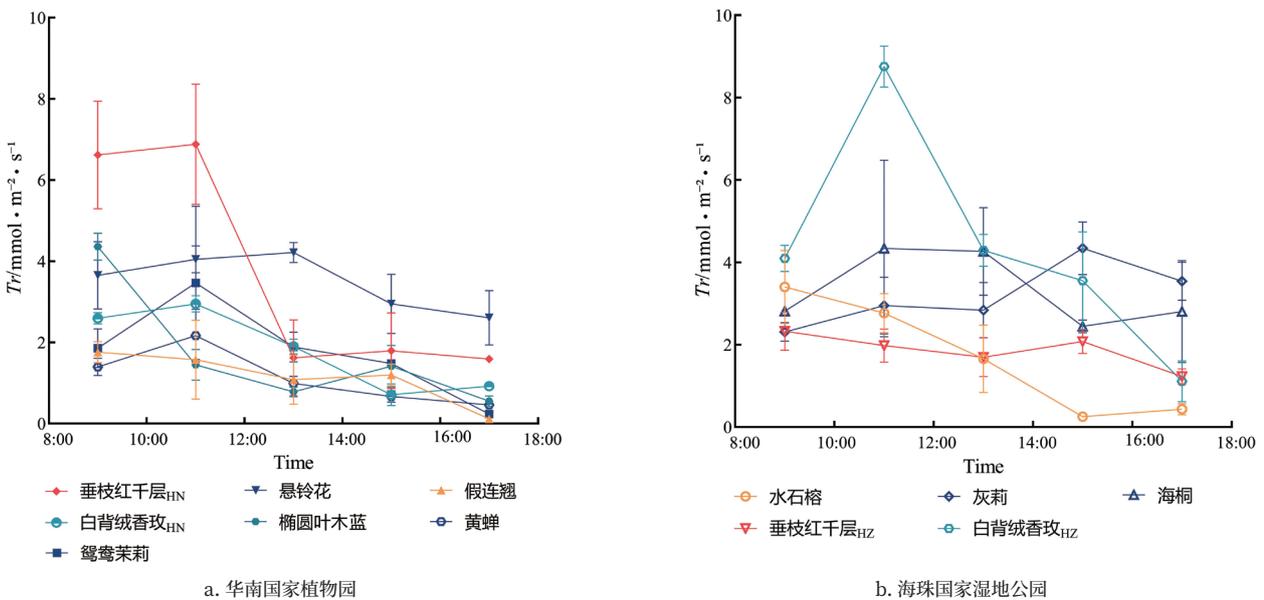


图 2 湿地木本植物蒸腾速率日变化
Fig.2 Daily variation of transpiration rate of wetland woody plants

绿乔木(图3)。

2.2 净光合速率对光的响应曲线分析

光响应曲线是描述植物净光合速率随光照强度变化的曲线。由于试验植物材料的AQY数据少且较为分散, P_{max} 、LSP与LCP数值变化大, 且冬季气候影响曲线真实性, 难以获得准确的LSP与LCP值。为确保分析准确, 补选11种湿地木本植物光响应数据辅助论证。从 P_n -PAR曲线中可知(图4), 大部分植物的 P_n 随着PAR的增加而增加, 在达到光饱和点之后, 曲线逐渐趋于平缓。在相同PAR条件下, P_n 数值越大, 说明植物具有越强的光能利用能力与碳同化能力。图中蓝花藤、垂枝红千层_{HN}与海桐曲线整体 P_n 数值最高, 其冬季光能利用能力与碳同化能力较强; 其次为白背绒香玫_{HN}、鸳鸯茉莉、悬铃花、小叶紫薇、椭圆叶木蓝、龙柏、蝶花荚蒾、朱缨花、白背绒香玫_{HZ}、阳桃、灰莉、假连翘、黄蝉、夹竹桃、垂枝红千层_{HZ}、蒲桃; 整体数值最低的为落羽杉、鹰爪花、假苹婆、水石榕。按生活型对植物的光能利用能力进行综合排序, 从强到弱依次为常绿藤本、常绿灌木、常绿乔木、落叶灌木、落叶乔木。此外, 乡土植物与外来植物没有明显的差异, 多数外来引进植物(如蓝花藤、鸳鸯茉莉等)对华南地区生长环境适应良好。

具体来看(表2), 光响应曲线的斜率即为表观量子效率AQY, 在弱光阶段该值越大, 说明植物在利用弱光进行光合作用时的效率越高。本试验植物AQY平均值约为0.05, 假连翘数值最大, 为0.09, 说明它能在较低光照强度下更有效地进行光合作用, 从而积累更多的有机物。 P_{max} 能反映叶片光合作用的效率与强度。蓝花藤的 P_{max} 值最大, 为 $18.65 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其次为垂枝红千层_{HN}、白背绒香玫_{HN}与海桐。LSP数值越高, 说明植物对强光耐受能力越强; LCP数值越低, 说明植物对弱光利用能力越强。试验中,

对强光耐受能力较强的5种植物为小叶紫薇、海桐、鸳鸯茉莉、朱缨花、龙柏; 对弱光利用能力较强的5种植物为落羽杉、鹰爪花、假连翘、阳桃、蒲桃。

2.3 固碳释氧与增湿降温能力分析

根据植物净光合速率日变化数据, 计算出湿地木本植物的日固碳释氧量与日增湿降温量(表3)。从单位叶面积计算日固碳释氧量来看, 海桐日固碳量和释氧量最高, 分别为 $11.91 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $8.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。按单位叶面积日固碳释氧量排序, 从高到低依次为海桐、悬铃花、灰莉、鸳鸯茉莉、白背绒香玫_{HN}、白背绒香玫_{HZ}、假连翘、垂枝红千层_{HN}、椭圆叶木蓝、黄蝉、垂枝红千层_{HZ}、水石榕。从叶面积指数LAI来看, 常绿灌木平均值为5.23, 常绿乔木平均值为7.80, 乡土植物与外来植物的LAI值相近。白背绒香玫_{HZ}的LAI值最大, 为8.44; 其次为垂枝红千层_{HN}、垂枝红千层_{HZ}、水石榕、鸳鸯茉莉、海桐、黄蝉、悬铃花、灰莉、椭圆叶木蓝、假连翘、白背绒香玫_{HN}。从结合LAI计算所得的单位土地面积日固碳释氧量来看, 海桐的日固碳、释氧量仍居高位, 数值大幅上升, 分别为 $78.03 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $56.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。按单位土地面积日固碳释氧量排序, 从高到低依次为: 海桐、悬铃花、白背绒香玫_{HZ}、鸳鸯茉莉、灰莉、垂枝红千层_{HN}、垂枝红千层_{HZ}、黄蝉、水石榕、椭圆叶木蓝、假连翘、白背绒香玫_{HN}。整体来看, 木本植物单位土地面积日固碳释氧显著高于单位叶面积, 垂枝红千层_{HZ}、鸳鸯茉莉等差异大, 假连翘、白背绒香玫_{HN}等差异小, 可见植物绿量和生长状况对于其实际固碳释氧量影响大。湿地木本植物按平均单位叶面积日固碳释氧量排序, 从高到低依次为常绿灌木、乡土植物、外来植物、常绿乔木; 按平均单位土地面积日固碳释氧量排序, 从高到低依次为常绿乔木、乡土植物、常绿灌木、外来植物。

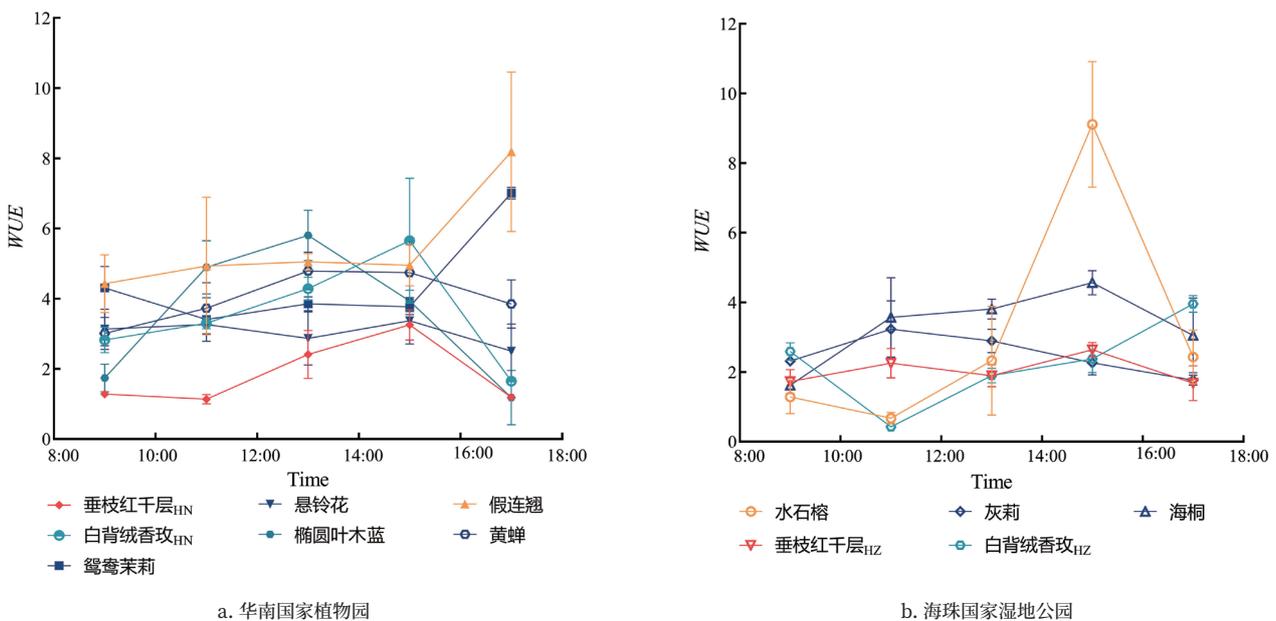
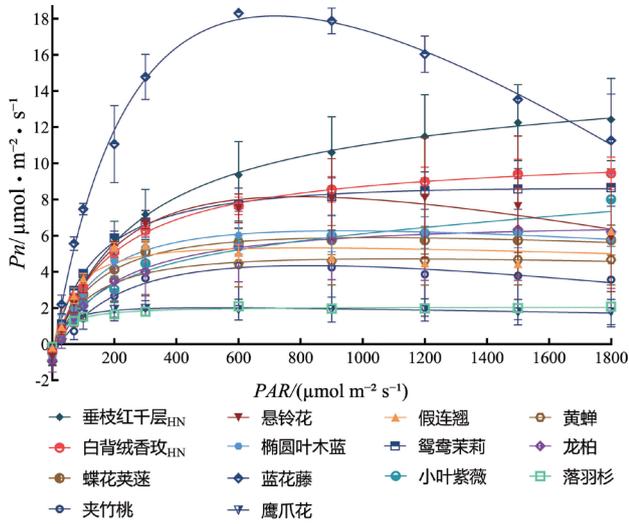
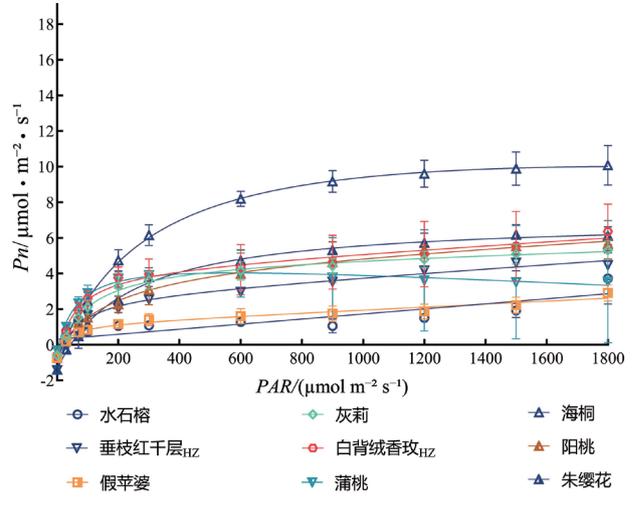


图3 湿地木本植物水分利用率日变化

Fig.3 Daily variation of water use efficiency of wetland woody plants



a. 华南国家植物园



b. 海珠国家湿地公园

图4 湿地木本植物 P_n 对光响应曲线拟合

Fig.4 P_n response curve fitting to light of wetland woody plants

表2 湿地木本植物的光响应曲线相关参数

Tab.2 Related parameters of light response curves of wetland woody plants

试验地点	名称	表观量子斜率 AQY	最大光合值 $P_{max}/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	光饱和点 $LSP/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	光补偿点 $LCP/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	暗呼吸速率 $R_d/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
华南国家植物园 (HN)	垂枝红千层 _{HN}	0.06	14.34	-	-	0.76
	悬铃花	0.06	8.38	833.20	11.66	0.66
	假连翘	0.09	5.18	1 020.20	5.01	0.43
	白背绒香玫 _{HN}	0.06	10.59	-	9.16	0.48
	椭圆叶木蓝	0.06	6.30	976.73	10.82	0.61
	黄蝉	0.05	4.72	1 098.05	13.58	0.56
	鸳鸯茉莉	0.08	8.59	1 771.40	6.25	0.45
	蓝花藤	0.08	18.65	764.46	-	-
	小叶紫薇	0.04	6.81	2 260.38	36.67	1.13
	蝶花荚蒾	0.06	5.89	1 030.25	11.41	0.59
	夹竹桃	0.03	4.38	829.93	21.95	0.65
	龙柏	0.04	5.01	1 398.25	12.53	0.48
	落羽杉	0.05	2.08	836.45	2.78	0.13
鹰爪花	0.07	2.03	594.32	4.25	0.25	
海珠国家湿地公园 (HZ)	海桐	0.05	10.12	1 946.43	21.19	0.88
	灰莉	0.04	5.48	-	13.41	0.54
	水石榕	0.03	2.09	-	13.38	0.16
	垂枝红千层 _{HZ}	0.04	4.02	423.21	17.30	0.75
	白背绒香玫 _{HZ}	0.07	5.56	-	8.65	0.58
	假苹婆	0.05	1.80	-	12.85	0.44
	阳桃	0.02	6.61	1 223.61	5.23	0.22
	朱缨花	0.04	6.97	1 451.75	54.34	1.39
蒲桃	0.05	6.31	-	6.06	0.27	

按单位叶面积日增湿降温量排序, 从高到低依次为白背绒香玫_{HZ}、垂枝红千层_{HN}、悬铃花、海桐、灰莉、水石榕、鸳鸯茉莉、垂枝红千层_{HZ}、白背绒香玫_{HN}、椭圆叶木蓝、假连翘、黄蝉。按单位土地面积日增湿量、降温量排序, 从高到低依次为白背绒香玫_{HZ}、垂枝红千层_{HN}、海桐、悬铃花、灰莉、水石榕、垂枝红千层_{HZ}、鸳鸯茉莉、黄蝉、椭圆叶木蓝、白背绒香玫_{HN}、假连翘。其中, 由于白背绒香玫_{HZ}与垂枝红千层_{HN}在冬季生长状态良好, 枝叶繁茂, 其单位土地面积的日增湿量、降温量最高, 分别为 $20\ 691.50\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 与 $14\ 889.26\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $40.33\ ^\circ\text{C}$ 与 $29.02\ ^\circ\text{C}$ 。假连翘单位土地面积日增湿、降温量为 $1\ 846.32\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $3.60\ ^\circ\text{C}$, 在冬季日增湿降温能力最弱。湿地木本植物按平均单位叶面积日增湿降温量排序, 从高到低依次为乡土植物、常绿灌木、常绿乔木、外来植物; 按单位土地面积日增湿降温量排序, 从高到低依次为常绿乔木、乡土植物、常绿灌木、外来植物。

2.4 固碳释氧与增湿降温能力聚类分析

综合本试验数据, 通过系统聚类分析法对湿地木本植物单位叶面积与单位土地面积的日固碳释氧量、增湿降温量进行等级分类, 并绘制水平谱系图(图5~6)。按单位叶面积日固碳释氧、增湿降温能力排序, 从强到弱可分为3级: 1级为灰莉、海桐、悬铃花; 2级为白背绒香玫_{HZ}和垂枝红千层_{HN}; 3级为垂枝红千层_{HZ}、水石榕、黄蝉、椭圆叶木蓝、假连翘、鸳鸯茉莉和白背绒香玫_{HN}。按单位土地面积日固碳释氧、增湿降温能力排序, 从高到低可分为4级: 1级为海桐; 2级为悬铃花、灰莉、鸳鸯茉莉; 3级白背绒香玫_{HZ}与垂枝红千层_{HN}; 4级为垂枝红千层_{HZ}、水石榕、黄蝉、椭圆叶木蓝、假连翘、白背绒香玫_{HN}。总体来看, 常绿灌木的固碳释氧、增湿降温能力优于常绿乔木。

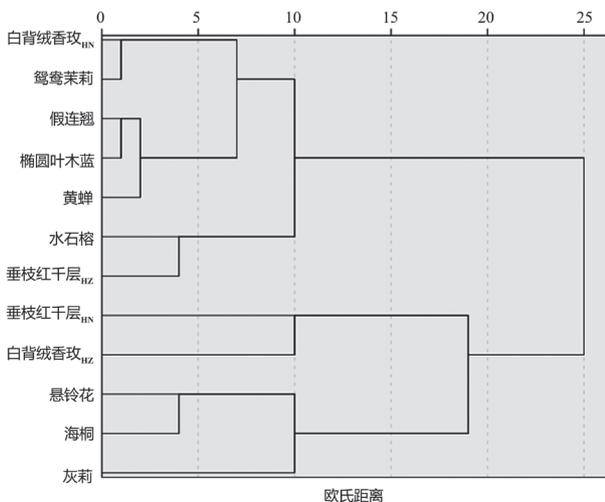


图5 单位叶面积固碳释氧与增湿降温能力聚类分析
Fig.5 Cluster analysis of carbon fixation, oxygen release and humidification and cooling capacity per unit leaf area

3 讨论

在本试验中, 大部分湿地木本植物在冬季表现出较高的光合活性。外部原因为华南地区冬季气候适宜, 对植物光合作用的负面影响相对有限; 内部原因为植物内部生理机制的调节作用, 植物通过调整气孔闭合、叶绿素含量、酶活性等方式适应外界环境变化, 如“光合午休”是植物应对环境日变化做出的保护措施。陈高路等^[29]研究得出“光合午休”的成因可归结为气孔因素与非气孔因素, 两者与光合速率、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度、气孔限制值等生理指标有关; 且杨通文等^[30]研究进一步指出季节变换会改变这些指标对“光合午休”的影响程度。本试验中, 垂枝红千层、假连翘、椭圆叶木蓝的 P_n 与 T_r 曲线走势与出现峰值的时间基本一致, T_r 随气孔闭合而下降, 推断这些植物可能主要受气孔限制值指标影响; 白背绒香玫_{HZ}、灰莉、水石榕的 P_n 与 T_r 曲线走势与出现峰值的时间不一致, 可能受环境光照、温湿度等非气孔因素影响。西双版纳热带植物园相关研究表明, 植物中午的气孔导度与枝条水分状况呈正相关, 而非与叶片有关^[31]。本次试验的白背绒香玫_{HZ}、垂枝红千层_{HN}、水石榕、椭圆叶木蓝具有明显的“光合午休”特征, 且 WUE 在光抑制现象后上升, 表明这些植物在消耗较少水分的情况下能够进行更多的光合作用。结合上述研究成果, 可推断这4种植物可能内部水分不足, 尤其枝条的水分状况较差, 植物需要通过及时调整自身的生理活动来平衡内部水分环境, 保障其枝条的水分储存和正常运输。根据图1与表2, 深入分析“光合午休”出现的时间差异, 垂枝红千层_{HZ}、垂枝红千层_{HN}、椭圆叶木蓝、假连翘与灰莉“光合午休”出现的时间晚于水石榕与白背绒香玫_{HZ}, 前者除垂枝红千层_{HZ}外, P_{max} 值较大, 能耐受更长时间的强光并将其高效地转化成能

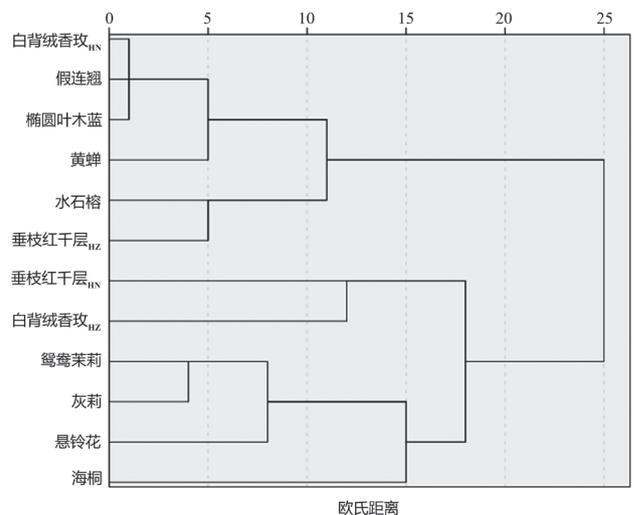


图6 单位土地面积固碳释氧与增湿降温能力聚类分析
Fig.6 Cluster analysis of carbon fixation, oxygen release and humidification and cooling capacity per unit land area

表 3 湿地木本植物日固碳释氧量与日增湿降温量
Tab.3 Daily carbon fixation, oxygen release, daily humidification, and cooling of wetland woody plants

试验地点	名称	叶面积指数 LAI	日同化总量 A/ mmol · m ⁻² · s ⁻¹	单位叶面积日固碳量 W _{CO₂} / g · m ⁻² · d ⁻¹	单位叶面积日释氧量 W _{O₂} / g · m ⁻² · d ⁻¹	单位土地面积日固碳量 P _{CO₂} / g · m ⁻² · d ⁻¹	单位土地面积日释氧量 P _{O₂} / g · m ⁻² · d ⁻¹	日蒸腾总量 E/ mol · m ⁻² · d ⁻¹	单位叶面积日增湿量 W _{H₂O} / g · m ⁻² · d ⁻¹	单位叶面积日降温量 ΔT/°C	单位土地面积日增湿量 P _{H₂O} / g · m ⁻² · d ⁻¹	单位土地面积日降温量 P _{ΔT} /°C
华南国家植物园 (HN)	垂枝红千层 ^{HN}	7.98	152.42±21.83 fg	5.37±0.76 fg	3.90±0.56 fg	42.81±6.13 c	31.14±4.46 c	103.66±12.38 b	1 865.82±222.70 b	3.64±0.43 b	14 889.26±1 777.18 b	29.02±3.46 b
	悬铃木	5.70	293.98±5.92 b	10.35±0.21 b	7.53±0.15 b	58.96±1.18 b	42.88±0.86 b	103.22±6.86 b	1 857.89±123.40 b	3.62±0.24 b	10 586.34±703.15 cd	20.63±1.37 cd
	假连翘	2.97	159.56±17.70 e	5.63±0.62 ef	4.08±0.46 ef	16.67±1.85 e	12.14±1.35 e	34.51±10.63 d	621.16±191.28 d	1.21±0.38 d	1 846.32±568.56 h	3.60±1.11 h
	白背绒香玫 ^{HN}	2.08	185.57±5.55 d	6.53±0.19 d	4.75±0.14 d	13.61±0.41 e	9.90±0.29 e	52.67±1.34 c	948.06±24.08 c	1.85±0.05 c	1 975.09±50.17 gh	3.85±0.10 gh
	椭圆叶木蓝	3.39	149.57±7.99 fg	5.27±0.28 fg	3.83±0.20 fg	17.82±0.095 e	12.96±0.69 e	43.88±2.31 cd	789.92±41.53 d	1.54±0.08 d	2 673.95±140.59 gh	5.21±0.27 gh
	黄蝉	5.79	128.49±12.64 gh	4.52±0.45 gh	3.29±0.32 gh	26.19±2.58 d	19.04±1.88 d	34.23±7.31 d	616.11±131.57 d	1.20±0.26 d	3 567.51±761.86 g	6.95±1.49 g
	鸳鸯茉莉	6.62	203.53±28.45 d	7.16±1.00 d	5.21±0.73 d	47.42±6.63 c	34.49±4.82 c	56.73±13.78 c	1 021.19±248.03 c	1.99±0.49 c	6 759.40±1 641.74 f	13.17±3.20 f
	海桐	6.55	338.40±33.21 a	11.91±1.17 a	8.67±0.85 a	78.03±7.65 a	56.75±5.57 a	99.76±20.40 b	1 795.61±367.10 b	3.50±0.72 b	11 762.59±2 404.77 c	22.92±4.69 c
	灰莉	5.56	234.41±16.02 c	8.25±0.57 c	6.00±0.41 c	45.87±3.13 c	33.36±2.28 c	93.96±2.21 b	1 691.28±39.70 b	3.30±0.08 b	9 401.58±220.71 de	18.32±0.43 de
	水石榕	7.60	70.87±7.51 i	2.49±0.27 i	1.81±0.19 i	18.96±2.01 e	13.79±1.46 e	57.25±0.95 c	1 030.54±17.09 c	2.01±0.03 c	7 832.94±129.90 ef	15.27±0.25 ef
(HZ)	垂枝红千层 ^{HZ}	7.83	110.08±9.65 h	3.87±0.34 h	2.82±0.25 h	30.35±2.66 d	22.07±1.94 d	54.23±6.91 c	976.10±124.42 b	1.90±0.24 c	7 646.53±974.67 ef	14.90±1.90 ef
	白背绒香玫 ^{HZ}	8.44	182.32±11.10 de	6.41±0.40 de	4.67±0.29 de	54.16±3.30 b	39.39±2.40 b	136.20±6.13 a	2 451.60±110.22 a	4.78±0.22 a	20 691.50±5 582.29 a	40.33±1.81 a
常绿灌木	5.23	208.42±68.18	7.33±0.21	5.34±0.15	39.86±21.77	28.99±15.84	72.51±35.71	1 305.23±642.72	2.54±1.25	7 667.75±6 011.25	14.94±11.71	
常绿乔木	7.80	111.12±37.42	5.22±1.20	3.79±0.87	42.44±10.97	30.87±7.98	71.77±24.98	1 291.93±449.70	2.52±0.88	10 131.30±3 711.29	19.75±7.23	
乡土植物	6.31	194.24±94.20	6.84±3.32	4.97±2.41	41.67±21.17	30.31±15.40	77.74±28.32	1 399.42±509.82	2.73±0.99	9 105.17±3 992.55	17.75±7.78	
外来植物	5.26	169.89±30.88	5.98±1.07	4.35±0.79	31.84±16.97	23.16±12.34	64.74±38.38	1 165.38±690.84	2.27±1.35	7 133.49±7 259.69	13.90±14.15	
总计	5.88	181.10±74.83	6.48±2.63	4.71±1.92	37.57±19.89	39.39±2.40	72.33±33.01	1 301.90±594.24	2.54±1.16	8 283.64±5 582.29	16.14±10.88	

注：表中数据为平均值±标准差，同列数据后不同字母表示不同植物间差异显著 (P<0.05)。

量。垂枝红千层_{HZ}的 P_{max} 值比垂枝红千层_{HN}的低,这表明植物的光利用能力受生长环境差异影响。相反,白背绒香玫_{HZ}的 AQY 与 P_{max} 值均处于较高的水平,但环境光照的快速增强促使叶片气孔早闭,导致“光合午休”现象提前。

植物的生活型、生长形态等因素对单位叶面积与单位土地面积的固碳释氧、增湿降温量的差异性具有重要影响。对比分析HN和HZ的垂枝红千层和白背绒香玫的试验数据,在单位叶面积的计算下,垂枝红千层_{HN}的 A 、 W_{CO_2} 、 W_{O_2} 的值稍大于垂枝红千层_{HZ},日增湿降温数值约为后者的2倍;白背绒香玫_{HN}与白背绒香玫_{HZ}的 A 、 W_{CO_2} 、 W_{O_2} 值基本一致,后者的 E 、 W_{H_2O} 与 ΔT 约为前者2倍有多。单位土地面积数据基于叶面积指数计算所得,故将植物的树冠大小和叶片分布密度数据纳入对比分析的考虑范围, LAI 越高,单位土地面积日固碳释氧量与增湿降温量越高。两地垂枝红千层的 LAI 相近,导致其固碳释氧量、增湿降温量差距不大;相比之下,白背绒香玫_{HZ}的 LAI 约为白背绒香玫_{HN}的4倍,白背绒香玫_{HZ}固碳释氧量、增湿降温量显著增加。仅从 LAI 计算公式中可知 H 、 D 、 Sh 为3个最重要的影响因子,但实际上 LAI 为多因子综合作用的结果,并非简单的线性关系。王永杰^[32]通过研究福州城市公园树木的 LAI 得出,乔木的 LAI 与树高、胸径、冠幅呈正相关,灌木反之,且植株的生长形态、树形、叶片倾斜角、不同冠层的密度等因素对 LAI 有显著影响。本试验中,两地的垂枝红千层的龄期、生长形态等方面相差较大,但 LAI 计算结果显示两者整体形态差异不大。这是因为垂枝红千层_{HN}较矮,其冠幅能够更有效地利用空间,枝叶在三维空间内均匀分布;而垂枝红千层_{HZ}较高且枝叶集中在植株中上层,在三维空间中的分布呈非均匀性。相比之下,白背绒香玫_{HZ}虽高度和冠幅稍小,但叶片覆盖面积较大, LAI 值显著增大。由此说明,单位土地面积的固碳释氧及增湿降温效益与植物的形态特征密切相关,其中 LAI 是反映这些特征的重要综合指标。

综合多年来专家学者跨地域、跨季节的深入研究,可从多维度探讨本试验湿地木本植物固碳释氧与降温增湿能力的差异。在整体层面上,试验结果显示常绿灌木相较于常绿乔木展现出更强的固碳释氧与降温增湿能力,与郜晴等^[33]基于445种植物研究得出的结论相同。在植物群落层面,侯文硕等^[34]通过探究植物群落构成与规格的差异对固碳释氧效益的影响,得出乔灌草复合结构不仅固碳释氧量最大且涵盖区间较宽,优于乔草和乔灌结构;深圳种植的以假连翘为主的灌草群落在夏季的固碳效益较高,增湿效益中等,降温效益较弱^[35];南宁栽培的由假连翘、灰莉、黄蝉等组成的灌草组团日增湿降温效益中等偏下^[36],这些与本试验中所测假连翘、灰莉增湿降温效益较低的特性基本符合。由此说明复杂植物群落结构对固碳释氧的增强作用,及木本植物在群落中的重要性。在个体层面,本试验中海桐在冬季展现出卓越的光合作用、固碳释氧及增湿降温能力,与晏增等^[37]在郑州冬季试验结论相同,且海桐不仅能为湿地生态系统碳汇功能作出重要贡献,还兼具吸附尘土、净化空气的多重效

益^[37]。此外,季节显著影响植物生理活动,如栗学铭等^[38]在茂名测得假连翘与灰莉在夏季的净光合速率日变化曲线与本试验相似,均为双峰型曲线,同时夏季净光合速率数值整体高于冬季。在不同地理气候地区栽培相同植物,植物的固碳能力表现存在差异性,如张坛烁^[39]测得东北地区栽培的假连翘为高固碳植物,与本试验结果不相同,这说明地域气候等环境因素对植物固碳能力有重要影响。上述研究为后人从多维度理解植物在生态系统中的固碳释氧与增湿降温功能提供坚实基础,为生态修复与城市规划提供科学依据。

4 结论

本实验通过测定光合日变化参数与 P_n - PAR 曲线,计算获得10种华南地区湿地木本植物冬季日固碳释氧和增湿降温量,并对比分析其日固碳释氧和增湿降温能力。研究发现:湿地木本植物净光合速率日变化曲线主要表现为单峰型与双峰型曲线,“光合午休”现象主要受植物自身光利用能力的限制及环境因素的调控。其中,海桐、悬铃花、灰莉、鸳鸯茉莉、白背绒香玫冬季光合作用能力较强,在低温条件下仍能保持高效的光能转换。假连翘、鸳鸯茉莉、黄蝉具有较好的水分利用能力,能良好适应湿地系统中水分的波动。通过分析 P_n - PAR 曲线可知,蓝花藤、垂枝红千层_{HN}与海桐冬季光能利用能力与碳同化能力较强。在适应光照强度变幅较大的环境中,鸳鸯茉莉的强光耐受性与弱光利用能力突出。总体上,在光能捕获利用与固碳释氧、与降温增湿能力方面,常绿灌木优于常绿乔木,乡土植物优于外来植物。

在构建高固碳效能型湿地景观时,应秉持乔灌草相结合的生态理念,以常绿植物与乡土植物为主导,适当辅以落叶植物与外来植物。本次试验研究结果显示,海桐、悬铃花、灰莉、白背绒香玫等常绿灌木在增强湿地碳汇能力与优化微气候环境方面具有优势。常绿乔木垂枝红千层与水石榕在冬季亦表现出良好的生态适应性。在此基础上,可引入诸如鸳鸯茉莉、假连翘、黄蝉及椭圆叶木蓝等光合作用能力稍弱但同样重要的植物种类,以构建稳定性强、层次丰富的湿地植物群落。依据光照条件,强光区宜种植小叶紫薇、海桐等喜光植物,荫蔽区则适宜种植落羽杉、鹰爪花等耐阴种类。在植物的生长形态上,需注意树形、枝形、叶形的搭配,结合植物生活型考虑高度与冠幅的修剪作业。

本试验所选植物较易成活、管养便利,既满足观赏美需求,又经济实用,期望为提升湿地生态系统景观丰富度与生态价值提供有力支持。本试验季节为冬季,以木本植物为研究对象,结合华南地区乡土植物与适应性良好的外来植物作为研究材料,增设现有学术研究较少的植物,如椭圆叶木蓝、白背绒香玫,分析其季节性光合变化、固碳释氧与增湿降温能力以补充研究领域空白。但因研究受限于时间与人力资源,未能针对湿地木本植物净化水质、降尘减噪、区域微气候调节等生态功能进行综合性评估,也未能进一步深化构建高固碳型湿地植物群落结构的指导意见。因此,基于本次试验结果,未来将从更为宏观的角度深化对湿地木本植物各项生态功能的研究,聚焦于尚未被充分探索的湿地植物,构建更为详尽的湿地植物数据库。

注：本文图片均为作者自绘。

参考文献：

- [1] 王瑞江. 广东湿地植物 [M]. 郑州：河南科学技术出版社，2021.
- [2] 袁晓初，张弯弯，王发国，等. 广东省湿地维管植物资源现状及保护利用 [J]. 植物科学学报，2018，36 (2)：211-220.
- [3] 黄燕，庞兴宸，陈景锋，等. 广佛地区典型湿地类型植物多样性与土壤因子的关系 [J]. 热带亚热带植物学报，2022，30 (5)：697-707.
- [4] 侯岳，王畅，李运远. 基于生物多样性的人工湿地植物群落构建途径 [J]. 城市建筑，2023，20 (3)：202-205.
- [5] 王继丰，韩大勇，王建波，等. 三江平原湿地小叶章群落沿土壤水分梯度物种组成及多样性变化 [J]. 生态学报，2017，37 (10)：3515-3524.
- [6] 李峰平，魏红阳，马喆，等. 人工湿地植物的选择及植物净化污水作用研究进展 [J]. 湿地科学，2017，15 (6)：849-854.
- [7] 李莹，张洲，杨高明，等. 湿地植物根系泌氧能力和根表铁膜与根系吸收重金属的关系 [J]. 生态环境学报，2022，31 (8)：1657-1666.
- [8] 车铭哲，于劲翔. “以鸟为本”理念下的滨海湿地生态修复规划——以北戴河七里海潟湖湿地生态修复项目为例 [J]. 规划师，2019，35 (7)：55-59.
- [9] 马晓雨. 细胞型多效能海绵湿地植物景观的构建 [J]. 工程建设与设计，2020 (1)：178-179，182.
- [10] 王晓雯，许铭宇，黄丽，等. 基于低养护持久景观的湿地植物配置模式探讨 [J]. 江西农业学报，2018，30 (5)：39-43.
- [11] REHMAN F, USMAN A, DITTA A, et al. Optimal root oxygen release from two macrophytes *Saururus cernuus* L. and *Pistia stratiotes* L. varies with light and temperature in simulated constructed wetlands microcosms [J]. *Rhizosphere*, 2023, 26: 100697.
- [12] PAL S, CHATTOPADHYAY B, DATTA S, et al. Potential of wetland macrophytes to sequester carbon and assessment of seasonal carbon input into the East Kolkata Wetland Ecosystem [J]. *Wetlands*, 2017, 37 (3)：497-512.
- [13] 温宥越，孙强，燕玉超，等. 粤港澳大湾区陆地生态系统演变对固碳释氧服务的影响 [J]. 生态学报，2020，40 (23)：8482-8493.
- [14] 乔亚军，张慧，刘坤，等. 呼伦贝尔林草交错带植被固碳释氧功能变化及其驱动力研究 [J]. 水土保持研究，2022，29 (5)：164-170.
- [15] 田娜玲，魏耀锋，任佳，等. 森林生态系统服务功能研究进展 [J]. 宁夏农林科技，2023，64 (9)：45-48，51.
- [16] 杜雨航. 洞庭湖湿地南荻群落典型生态服务价值评价 [D]. 长沙：湖南农业大学，2024.
- [17] 广州市气象局. 广州市 2024 年 1 月气候影响评价 [EB/OL]. (2024-02-02) [2025-01-06]. <http://gd.cma.gov.cn/gzsqxj/>.
- [18] 中国湿地博物馆. 中国湿地植物数据库 [EB/OL]. (2020-01-31) [2025-01-06]. <http://zgswdz.com/>.
- [19] 张树仁. 中国常见湿地植物 [M]. 北京：科学出版社，2009.
- [20] 梁士楚. 广西湿地植物 [M]. 北京：科学出版社，2011.
- [21] 中国科学院华南植物研究所. 广东植物志：第 1 卷 [M]. 广州：广东科技出版社，1991.
- [22] 柯周荣. 华南常见景观植物 [M]. 南京：江苏凤凰科学技术出版社，2019.
- [23] 刘文，王伟，张继方，等. 6 种国外园林植物在广州的适应性和观赏性调查评价 [J]. 广东园林，2014，36 (4)：63-66.
- [24] 尹婷辉，林瑞君，孙林，等. 华南 22 种园林植物耐涝性筛选 [J]. 浙江林业科技，2022，42 (1)：31-40.
- [25] 尹伊凡. 重庆湿生树种耐淹性评价及配置优化 [D]. 重庆：重庆交

通大学，2023.

- [26] 叶子飘. 光合作用对光和 CO₂ 响应模型的研究进展 [J]. 植物生态学报，2010，34 (6)：727-740.
- [27] 姚侠妹，偶春，夏璐，等. 安徽沿淮地区小城镇主要景观树种固碳释氧和降温增湿效益评估 [J]. 生态学杂志，2021，40 (5)：1293-1304.
- [28] NOWAK D J. Air Pollution Removal by Chicago's Urban Forest [C]//MCPHERSON E G, NOWAK D J, ROWNTREE R A. Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. Washington, D.C: USDA Forest Service, 1994: 63-82.
- [29] 陈高路，庞丹波，马进鹏，等. 贺兰山 10 种典型植物光合及水分利用效率特征研究 [J]. 西北植物学报，2021，41 (2)：290-299.
- [30] 杨通文，高秀梅，韩维栋. 不同季节桃金娘光合特性与光系统 PSII 活性研究 [J]. 西南农业学报，2022，35 (12)：2801-2810.
- [31] ZHANG Y, MEINZER F C, QI J, et al. Midday stomatal conductance is more related to stem rather than leaf water status in subtropical deciduous and evergreen broadleaf trees [J]. *Plant Cell Environ*, 2013, 36 (1)：149-158.
- [32] 王永杰. 福州市城市公园绿地主要树种叶面积指数特征及影响因素研究 [D]. 福州：福建农林大学，2018.
- [33] 邵晴，马锦义，邵海燕，等. 不同生活型园林植物固碳能力统计分析 [J]. 江苏林业科技，2020，47 (2)：44-47.
- [34] 侯文硕，张瑶，张颖，等. 城市绿地固碳释氧效益对植物群落特征因子响应分析 [J]. 风景园林，2024，31 (6)：55-61.
- [35] 杨帆. 深圳康复花园适用植物研究 [D]. 北京：北京林业大学，2013.
- [36] 陈明壤. 南宁市人民公园植物群落及夏季温湿效应研究 [D]. 南宁：广西大学，2023.
- [37] 晏增，赵蓬晖，杨淑红，等. 冬季郑州市 12 个常绿树种的光合特性及滞尘能力 [J]. 广西植物，2021，41 (9)：1433-1442.
- [38] 栗学铭，王亮，刘存福，等. 公路绿化植物光合特性及固碳释氧能力特性研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版)，2019，15 (11)：315-317.
- [39] 张坛烁. 低碳理念下城市口袋公园景观设计研究——以石家庄绣华园为例 [D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2024.

作者简介：

伍祖莹/2000 年生 / 女 / 广东广州人 / 仲恺农业工程学院园艺园林学院 (广州 510225) / 在读硕士研究生 / 专业方向为风景园林规划与生态修复

王芙蓉/1996 年生 / 女 / 四川巴中人 / 仲恺农业工程学院园艺园林学院 (广州 510225) / 在读硕士研究生 / 专业方向为风景园林规划与生态修复

(* 通信作者) 许铭宇/1991 年生 / 男 / 广东汕尾人 / 博士 / 仲恺农业工程学院园艺园林学院 (广州 510225) / 高级工程师 / 研究方向为林草生态修复与土地复垦综合整治 / E-mail: xmy4200@126.com

陈平/1968 年生 / 男 / 江苏南通人 / 硕士 / 仲恺农业工程学院园艺园林学院 (广州 510225) / 教授 / 研究方向为国土空间生态修复与草资源开发研究