

三峡库区消落带适生植物固碳释氧能力研究

冯晶红, 刘德富, 吴耕华, 刘煜, 秦东旭, 王可健, 刘瑛

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复及藻类利用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

摘要:固碳释氧是植物的一项重要生态功能, 三峡库区消落带分布范围广、面积大, 对其适生植物的固碳释氧能力进行研究具有重要的意义。以重庆市三峡库区开州区至万州区消落带 13 种适生植物为研究对象, 通过测定其净光合速率和叶面积指数, 分析研究其固碳释氧能力。结果表明, 13 种适生植物的净光合速率日变化曲线主要呈单峰型或双峰型曲线, 单峰型曲线植物有桑(*Morus alba*)、白芒(*Miscanthus sinensis*)和辣蓼(*Polygonum hydropiper*), 其他 10 种植物中山杉(*Taxodium 'Zhongshanshan'*)、竹柳(*Salix sp.*)、柑橘(*Citrus reticulata*)、牡荆(*Vitex negundo var. cannabifolia*)、地桃花(*Urena lobata*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)、芦苇(*Phragmites australis*)、大狼把草(*Bidens frondosa*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、合萌(*Aeschynomene indica*)的净光合速率日变化曲线均表现为双峰曲线, 单位叶面积日净同化量为 90.28~410.20 mmol/(m²·d), 固碳量为 3.18~14.44 g/(m²·d), 释氧量为 2.31~10.50 g/(m²·d); 单位土地面积日固碳量为 6.15~65.47 g/(m²·d), 释氧量为 4.48~47.62 g/(m²·d)。单位叶面积固碳释氧能力聚类分析表明, 乔木(3种)、灌木(3种)均分为两级, 草本(7种)分为三级; 单位土地面积固碳释氧能力分析表明, 乔木(3种)、灌木(3种)和草本(7种)均分为两级; 日固碳释氧能力较强的乔木为竹柳, 灌木有地桃花和牡荆, 草本有芦苇、辣蓼、鬼针草。本研究为三峡库区消落带生态修复工程中植被的选择应用提供了理论参考, 为消落带修复工程示范区生态效益的评价提供了科学依据。

关键词:固碳释氧; 消落带; 适生植物; 生态修复; 三峡库区

中图分类号: Q142.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2020)01-0001-08

三峡水库水位规律性涨落时被淹没土地周期性露出水面形成消落带, 而水库采取“蓄清排浑”的反季节性调水节律使得消落带的生态系统受到严重影响(苏维词, 2004; 罗芳丽, 2007; New & Xie, 2008; 胥焘等, 2014), 绝大多数原生长在消落带内的植物因难以适应生境变化而死亡(罗芳丽等, 2008; 揭胜麟等 2012), 这是导致三峡水库消落带存在诸多潜在生态环境问题的重要原因之一。探究水库消落带适生植物的生态功能是其植被恢复的重要基础, 也是解决水库消落带生态环境问题的前提。

植物光合固碳释氧是植物重要的生态功能(Patakiet al, 2006); 开展植物固碳释氧研究, 不仅能够探索植物光合作用的生理机能, 而且可为生态环境改善提供重要依据(Yu & Ong, 2003; 张一弓等, 2012)。目前, 针对水库消落带适生植物的光合固碳释氧生理生态功能的研究已有许多成果, 但已

有研究成果大多是针对水库消落带水淹胁迫对植物光合特性的影响, 包括光合色素含量、净光合速率的变化等(李昌晓等, 2005; 罗芳丽等, 2007; 陈芳清等, 2008; 华建峰等, 2017), 而鲜有对适生植物的光合固碳释氧生态过程的研究; 有些研究仅针对个别种的光合特性, 没有深入探究这些种的光合特性是否有趋同性, 而单个种光合特性并不能代表消落带的生态功能特性。基于以上考虑, 本研究拟从不同植物光合特性和固碳释氧能力的角度出发, 对重庆市三峡库区消落带 13 种适生植物的净光合速率日变化及固碳释氧能力进行分析比较, 并对不同植物固碳释氧能力进行了分级, 定量探究消落带适生植物的光合特性和固碳释氧能力, 以期为三峡库区消落带生态修复工程中植被的选择应用及生态效益评价提供参考。

1 材料与方 法

1.1 区域概况

实验样地位于重庆三峡库区开州区至万州区段消落带。重庆三峡库区位于长江上游下段, 东起巫山县、西至江津市、南起武隆县、北至开县, 主要土壤类型有水稻土、黄壤、石灰土、紫色土等, 其中, 紫色

收稿日期: 2017-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502208); 广东省水利科技创新项目(2015-05)。

作者简介: 冯晶红, 1988年生, 女, 助教, 主要从事景观生态修复与环境保护研究。E-mail: Feng_jinghong@yeah.net

通信作者: 刘瑛。E-mail: lycg06@163.com

土是库区分布面积最广的土壤类型,总面积约为16 613 km²,约占库区土地总面积的36%。库区江河纵横,长江干流自西向东横穿重庆三峡库区,全长660.3 km,北有嘉陵江、南有乌江汇入,形成不对称、向心的网状水系。全区地处中纬度,属湿润亚热带季风气候,多年平均气温15~18℃,平均降雨量约为1 150 mm,表现出明显的年度和季节性变化。

1.2 试验物种选择及生活型划分

试验样地消落带区水位变化与三峡库区水位变化一致,每年5月下旬水位退至150 m以下。为了

减少地形地貌、人类活动及水位波动变化等因素对植被光合作用的影响,于2017年7月下旬,即植物正处于夏季旺盛生长季,从开州区渠口镇至万州区石宝寨试验区段内,根据植物群落组成特征,选取近自然状态消落区155 m、165 m和175 m海拔区的优势适生植物共13种,隶属于11科,分为3种生活型;其中,乔木3种(中山杉、竹柳、柑橘)、灌木3种(牡荆、桑、地桃花)、草本7种(芦苇、白芒、苍耳、大狼把草、鬼针草、合萌、辣蓼),分别进行各植物叶片光合作用功能的测定,所测物种名录见表1。

表1 13种测试植物的基本信息

Tab.1 Basic information on the thirteen plant species tested

| 植物名称 | 科 | 植物类型 | 分布高程/m |
|---|------------------|-------|-----------|
| 中山杉 <i>Taxodium 'Zhongshanshan'</i> | 杉科 Taxodiaceae | 乔木 | 165 - 175 |
| 竹柳 <i>Salix sp.</i> | 杨柳科 Salicaceae | 乔木 | 165 - 175 |
| 柑橘 <i>Citrus reticulata</i> | 芸香科 Rutaceae | 乔木 | 165 - 175 |
| 牡荆 <i>Vitex negundo var. cannabifolia</i> | 马鞭草科 Verbenaceae | 灌木 | 165 - 175 |
| 桑 <i>Morus alba</i> | 桑科 Moraceae | 灌木 | 165 - 175 |
| 地桃花 <i>Urena lobata</i> | 锦葵科 Malvaceae | 灌木 | 165 - 175 |
| 芦苇 <i>Phragmites australis</i> | 禾本科 Gramineae | 多年生草本 | 165 - 175 |
| 白芒 <i>Miscanthus sinensis</i> | 禾本科 Gramineae | 多年生草本 | 165 - 175 |
| 苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i> | 菊科 Asteraceae | 一年生草本 | 155 - 165 |
| 大狼把草 <i>Bidens frondosa</i> | 菊科 Asteraceae | 一年生草本 | 155 - 175 |
| 鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> | 菊科 Asteraceae | 一年生草本 | 155 - 175 |
| 合萌 <i>Aeschynomene indica</i> | 豆科 Leguminosae | 一年生草本 | 155 - 165 |
| 辣蓼 <i>Polygonum hydropiper</i> | 蓼科 Polygonaceae | 一年生草本 | 155 - 165 |

1.3 试验方法

1.3.1 植物光合速率和叶面积指数测定 植物光合速率测定采用SY-1020便携式光合仪。于2017年7月20-30日,选择光照充足、无风或微风的晴天,在自然光照条件下,从8:00~18:00每隔2 h测定1次。测定时每种植物选择3株具有代表性的样株,每次每株植物选取阳面大小相近、生长健壮的4~6个叶片,在不离体的情况下,每片叶记录5个瞬时光合速率值,然后取其平均值,每种植物取3株样木的平均值,每天分5个时间段进行循环测定,同时各个时间段内测定树种的顺序保持不变。叶面积指数(leaf area index, LAI)是指所覆盖土地面积上植物叶片的总面积(张艳丽等,2013;庄大伟等,2014),计算公式为:

$$LAI=Y/S \quad (1)$$

式中:LAI为叶面积指数;Y为植物的总叶面积(m²);S为植物所覆盖的土地面积,即植物树冠投影面积(m²)。

本次试验测试过程中,植物单叶叶面积采用S-120型便携式叶面积仪测量。对每种植物取3株具有代表性的样木,每株取6片单叶进行测试并记录,

取所有叶面积测试数据的均值作为该种植物的单叶叶面积,进而采用标准枝法调查整株叶量,获得整个调查植株的叶片总面积;其中乔木和灌木树冠投影面积使用皮尺测量其冠幅大小,再通过计算得出(朱燕青,2013),草本植被覆盖面积以1 m×1 m样方计数。

1.3.2 植物固碳释氧能力计算 在植物光合作用日变化曲线中,其同化量是净光合速率曲线与时间横轴围合的面积(王忠君,2010)。根据各植物的净光合速率日变化曲线图,使用简单积分法计算测试植物在测定当日的净同化量(赵萱和李海梅,2009;郭晖等,2017),计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^j [(p_{i+1} + p_i) \div 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3600 \div 1000] \quad (2)$$

式中:P为测定日单位叶面积的净同化总量[mmol/(m²·d)];p_i为初测点的瞬时光合作用速率,p_{i+1}为i+1测点的瞬时光合作用速率[μmol/(m²·s)];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;3 600为每小时3 600 s;1 000为mmol与μmol的转化系数。

一般植物晚上的暗呼吸消耗量按照白天同化量的 20% 计算(王丽勉等,2007),则单位叶面积日净固定 CO_2 量按照以下公式计算:

$$W_{\text{CO}_2} = P \times (1 - 0.2) \times \frac{44}{100} \quad (3)$$

式中: W_{CO_2} 为测定日单位叶面积的净固定 CO_2 的质量 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; 44 为 CO_2 的摩尔质量 (g/mol)。

根据光合作用的反应方程: $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$, 测试植物在测定当日释放 O_2 质量计算公式为:

$$W_{\text{O}_2} = P \times (1 - 0.2) \times \frac{32}{100} \quad (4)$$

式中: W_{O_2} 为测定日单位叶面积释放 O_2 的质量 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; 32 为 O_2 的摩尔质量 (g/mol)。测试植物在测定当日单位土地面积上每天吸收 CO_2 和释放 O_2 量分别按照以下计算:

$$Q_{\text{CO}_2} = W_{\text{CO}_2} \times \text{LAI} \quad (5)$$

$$Q_{\text{O}_2} = W_{\text{O}_2} \times \text{LAI} \quad (6)$$

式中: Q_{CO_2} 为测定日单位土地面积的净固定 CO_2 的质量 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; Q_{O_2} 为测定日单位土地面积释放 O_2 的质量 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]。

1.4 数据分析

利用 SPSS 22.0 软件统计 13 种实验植物的单位叶面积固碳释氧能力和单位土地面积固碳释氧能力,采用 Word Method 离差平方和法进行聚类分析(刘雪莲等,2016),分别得出不同植物的聚类分析图。

2 结果与分析

2.1 光合速率日变化

本实验对 13 种植物的净光合速率日变化进行了测定,绘制了其日变化曲线(图 1)。从图 1 中可以看出,13 种植物的净光合速率峰值出现时刻有所不同,净光合速率的日变化曲线主要有单峰型和双峰型两类。单峰型曲线植物有桑、白芒和辣蓼,其他 10 种植物的净光合速率日变化曲线均表现为双峰曲线,即出现“光合午休”现象(赵萱和李海梅,2009;刘雪莲等,2016;熊向艳等,2014)。

乔木中,中山杉、竹柳和柑橘均呈现出双峰曲线,其中中山杉和柑橘的第一个峰值出现在 10:00-11:59,而竹柳的第一个峰值出现在 12:00-13:59,3 种乔木的第二个峰值均出现在 14:00-15:59。

3 种灌木中,桑的日变化呈现出单峰型曲线,在 8:00-11:59 净光合速率逐渐增大,12:00-13:59 达到最大,为 $10.54 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,之后净光合速率逐渐下降。地桃花和牡荆的日变化表现出双峰曲线,其中地桃花第一个峰值出现在 10:00-11:59,牡荆的出现在 8:00-9:59,地桃花的第二个峰值出现在 14:00-15:59,牡荆出现在 12:00-13:59。

草本植物中,白芒和辣蓼净光合速率的日变化表现出单峰曲线,其中白芒在第一个测定时间点即 8:00-9:59,其净光合速率就达到了当天的最大值,这与前人实验测定的实验结果类似(陈月华等,2012);而辣蓼净光合速率在 12:00-13:59 达到最大值,在李梅梅等(2007)的研究中也有类似情况。其他 5 种植物均表现出典型的双峰型曲线,其中芦苇和合萌第一个峰值出现在 8:00-9:59,其余的第一个峰值均在 8:00,在第二个峰值时间上,除苍耳出现在 10:00-11:59 外,其余的第二个峰值均出现在 12:00-15:59。

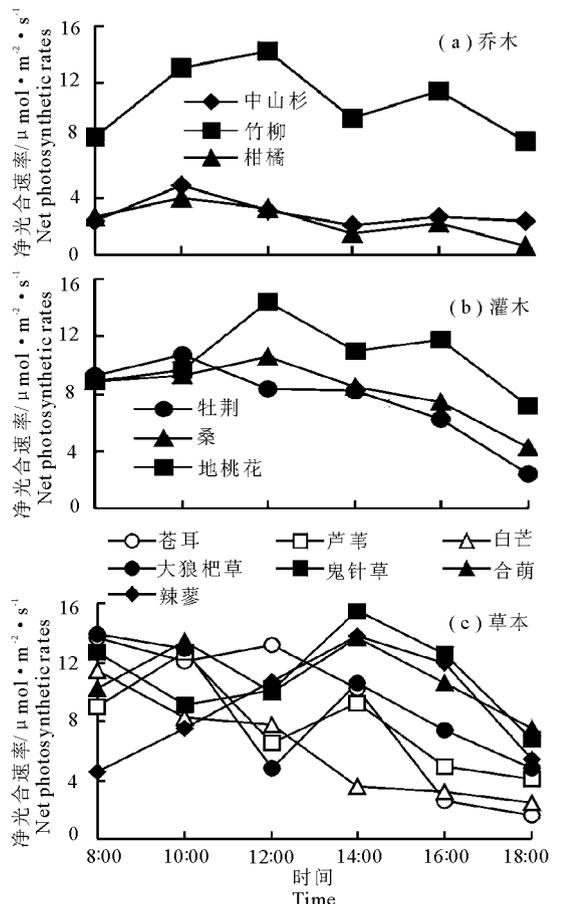


图 1 测试植物的净光合速率日变化

Fig.1 Diurnal variations in net photosynthetic rates for the 13 plant species

2.2 日均光合速率和叶面积指数

从表2中可知,实验测得的13种植物的日均光合速率在 $2.36\sim 11.11\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;其中,中山杉和柑橘的日均光合速率较小,分别为 $2.9\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 $2.36\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。乔木、灌木及草本植物的日均光合速率在 $5.33\sim 8.97\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,大小排序为:草本>灌木>乔木。

供试植物的叶面积指数分布在 $0.43\sim 6.58$;其中,竹柳、牡荆、柑橘、芦苇和辣蓼的叶面积指数较大。乔木、灌木及草本植物的叶面积指数均值在 $2.38\sim 3.90$,大小排序为:乔木>灌木>草本。

表2 测试植物日平均光合速率值和叶面积指数

Tab.2 Average photosynthetic rate and leaf area index (LAI) of the 13 plant species

| 植物名称 | 日均光合速率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ | 叶面积指数 |
|------|--|----------------|
| 中山杉 | 2.90 ± 0.08 | 2.80 ± 0.69 |
| 竹柳 | 10.72 ± 0.31 | 4.52 ± 0.27 |
| 柑橘 | 2.36 ± 0.25 | 4.37 ± 0.21 |
| 牡荆 | 7.52 ± 0.31 | 6.58 ± 0.18 |
| 地桃花 | 10.46 ± 0.86 | 1.88 ± 0.53 |
| 桑 | 8.12 ± 0.46 | 1.61 ± 0.25 |
| 芦苇 | 7.75 ± 0.95 | 5.68 ± 1.12 |
| 白芒 | 6.11 ± 0.31 | 1.96 ± 0.29 |
| 苍耳 | 8.88 ± 0.18 | 2.48 ± 0.89 |
| 大狼把草 | 9.05 ± 0.20 | 0.79 ± 0.20 |
| 鬼针草 | 11.11 ± 0.26 | 0.82 ± 0.18 |
| 合萌 | 10.89 ± 1.11 | 0.43 ± 0.11 |
| 辣蓼 | 8.99 ± 0.26 | 4.48 ± 0.58 |

2.3 单位叶面积的固碳释氧能力

净同化量是植物单位时间内光合作用产生的有机物与呼吸作用消耗的有机物之差,净同化量越大,说明植物的生产力越强,有机物累积量越大,固定在体内的碳含量越大。固碳释氧量的大小表明了植物叶片与外界进行气体、水分交换的生理机制强弱(张娇等,2012)。根据图1植物净光合速率的日变化曲线,通过式(2)-(4)计算分别得到13种植物单位叶面积的日光合净同化量(P)、固碳量(W_{CO_2})以及日释氧量(W_{O_2})(表3)。从表3中可知,3种乔木的单位叶面积净同化量、固碳量以及日释氧量分别在 $90.28\sim 405.17\ \text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $3.18\sim 14.26\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $2.31\sim 10.37\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,3个指标均以竹柳最高,柑橘最低。3种灌木的单位叶面积净同化量、固碳量以及日释氧量分别在 $282.68\sim 394.42\ \text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $9.95\sim 13.88\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $7.24\sim 10.1\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,3个指标均以地桃花最高、柑橘最低。7种草本植物的单位叶面积净同化量、固碳

量以及日释氧量分别在 $213.95\sim 410.2\ \text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $7.53\sim 14.44\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $5.48\sim 10.50\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,3个指标均以鬼针草最高、白芒最低。乔木、灌木及草本植物单位叶面积净同化量、固碳量及释氧量平均值分别在 $255.79\sim 331.83\ \text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $9.00\sim 11.68\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $6.55\sim 8.49\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,大小排序均为:草本>乔木>灌木。

表3 测试植物单位叶面积的日净同化量和日固碳释氧量
Tab.3 Daily net assimilation, carbon fixation and oxygen release capabilities of per unit leaf area for each plant species

| 植物名称 | 单位叶面积净同化量/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ | 固碳量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ | 释氧量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ |
|------|---|--|--|
| 中山杉 | 108.41 ± 3.23 | 3.82 ± 0.11 | 2.78 ± 0.08 |
| 竹柳 | 405.17 ± 13.89 | 14.26 ± 0.49 | 10.37 ± 0.36 |
| 柑橘 | 90.28 ± 9.57 | 3.18 ± 0.34 | 2.31 ± 0.24 |
| 牡荆 | 282.68 ± 11.53 | 9.95 ± 0.41 | 7.24 ± 0.30 |
| 地桃花 | 394.42 ± 30.21 | 13.88 ± 1.06 | 10.10 ± 0.77 |
| 桑 | 303.71 ± 15.16 | 10.69 ± 0.53 | 7.77 ± 0.39 |
| 芦苇 | 287.66 ± 38.81 | 10.13 ± 1.37 | 7.36 ± 0.99 |
| 白芒 | 213.95 ± 8.29 | 7.53 ± 0.29 | 5.48 ± 0.21 |
| 苍耳 | 328.56 ± 4.59 | 11.57 ± 0.16 | 8.41 ± 0.12 |
| 大狼把草 | 323.63 ± 8.53 | 11.39 ± 0.30 | 8.28 ± 0.22 |
| 鬼针草 | 410.20 ± 11.38 | 14.44 ± 0.40 | 10.50 ± 0.29 |
| 合萌 | 406.63 ± 33.51 | 14.31 ± 1.18 | 10.41 ± 0.86 |
| 辣蓼 | 352.17 ± 7.65 | 12.40 ± 0.27 | 9.02 ± 0.20 |

2.4 单位土地面积的日固碳释氧能力

根据表2、表3植物的叶面积指数及日固碳量,通过式(5)和(6)计算分别得到13种植物单位土地面积的日固碳量以及释氧量(表4)。由表4可知,3种乔木单位土地面积的日固碳量以及释氧量分别在 $10.69\sim 64.46\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $7.77\sim 46.88\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,2个指标均以竹柳最高、中山杉最低。3种灌木单位土地面积的日固碳量以及释氧量分别在 $17.21\sim 65.47\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $12.52\sim 47.62\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,2个指标均以牡荆最高、柑橘最低。7种草本植物单位土地面积的日固碳量以及释氧量分别在 $6.15\sim 57.51\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $4.48\sim 41.83\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,2个指标均以芦苇最高、合萌最低。乔木、灌木及草本植物单位土地面积固碳量及释氧量分别 $26.21\sim 35.15\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $19.07\sim 25.57\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,大小排序为:灌木>乔木>草本。

受叶面积指数的影响,植物单位叶面积固碳释氧量与单位土地面积固碳释氧量有明显差异。就灌木而言,牡荆单位叶面积固碳量和释氧量虽然不是最高(表3),分别为 $9.95\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $7.24\ \text{g}/$

($\text{m}^2 \cdot \text{d}$),但其叶面积指数最高,为 6.58,故其单位土地面积固碳释氧量最高(表 4);而地桃花的单位叶面积固碳量和释氧量虽然最高,分别为 $13.88 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $10.10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,但其叶面积指数较低,仅 1.88,故其单位土地面积固碳释氧量有所降低。因此,植物的固碳释氧能力不仅受白天的净光合速率和夜间呼吸速率的影响,还受该树种叶面积指数的影响(张艳丽等,2013;郭晖等,2017)。

表 4 测试植物单位土地面积的日固碳释氧量

Tab.4 Daily carbon fixation and oxygen release capabilities of per unit land area for each plant species

| 植物名称 | 固碳量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ | 释氧量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ |
|------|--|--|
| 中山杉 | 10.69 ± 0.32 | 7.77 ± 0.23 |
| 竹柳 | 64.46 ± 2.21 | 46.88 ± 1.61 |
| 柑橘 | 13.89 ± 1.47 | 10.10 ± 1.07 |
| 牡荆 | 65.47 ± 2.67 | 47.62 ± 1.94 |
| 地桃花 | 26.10 ± 2.00 | 18.98 ± 1.45 |
| 桑 | 17.21 ± 0.86 | 12.52 ± 0.62 |
| 芦苇 | 57.51 ± 7.76 | 41.83 ± 5.64 |
| 白芒 | 14.76 ± 0.57 | 10.74 ± 0.42 |
| 苍耳 | 28.68 ± 0.40 | 20.86 ± 0.29 |
| 大狼把草 | 9.00 ± 0.24 | 6.55 ± 0.17 |
| 鬼针草 | 11.84 ± 0.33 | 8.61 ± 0.24 |
| 合萌 | 6.15 ± 0.51 | 4.48 ± 0.37 |
| 辣蓼 | 55.54 ± 1.21 | 40.39 ± 0.88 |

2.5 测试植物固碳释氧能力聚类

利用 IBM SPSS Statistics 22.0 数理统计软件,使用 Word Method 离差平方和法,对 16 种测试植物单位叶面积日固碳释氧量进行聚类分析,结果见图 2。由图 2 可知,3 种乔木的单位叶面积固碳释氧能力分成两级,竹柳为一级,其固碳量为 $14.26 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,释氧量为 $10.37 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;中山杉、柑橘为二级,其固碳量为 $3.18 \sim 3.82 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,释氧量为 $2.31 \sim 2.78 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。3 种灌木的单位叶面积固碳释氧能力分成两级,地桃花为一级,其固碳量为 $13.88 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,释氧量为 $10.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;牡荆、桑为二级,其固碳量为 $9.95 \sim 10.69 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,释氧量为 $7.24 \sim 7.77 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。7 种草本的单位叶面积固碳释氧能力分成三级,鬼针草、合萌为一级,其固碳量为 $14.31 \sim 14.44 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,释氧量为 $10.41 \sim 10.50 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;苍耳、大狼把草、芦苇、辣蓼为二级,其固碳量为 $10.13 \sim 12.40 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,释氧量为 $7.36 \sim 9.02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;白芒为三级,其固碳量为 $7.53 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,释氧量为 $5.48 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

对 13 种测试植物单位土地面积日固碳释氧量进行聚类分析,结果见图 3。3 种乔木的单位土地面积固碳释氧能力分成两级,竹柳为一级,其固碳量为 $64.46 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,释氧量为 $46.88 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;

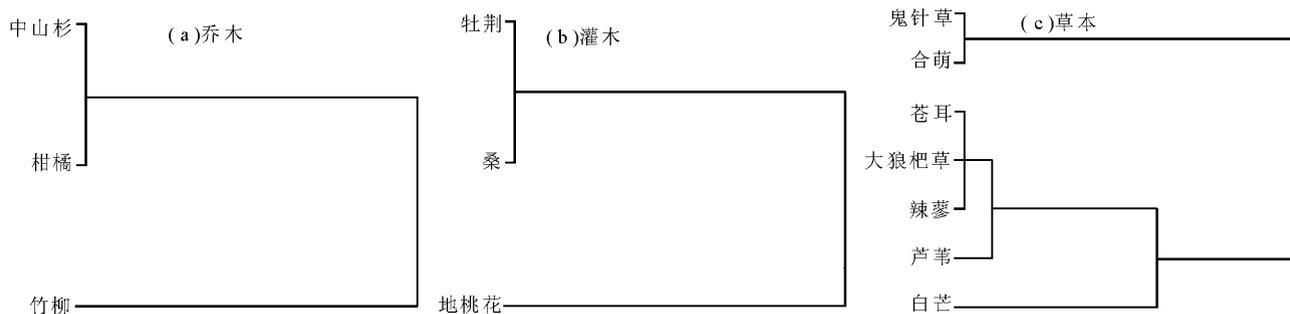


图 2 测试植物单位叶面积固碳释氧能力聚类分析

Fig.2 Cluster analysis of the 13 plant species based on carbon fixation and oxygen release capabilities per unit leaf area

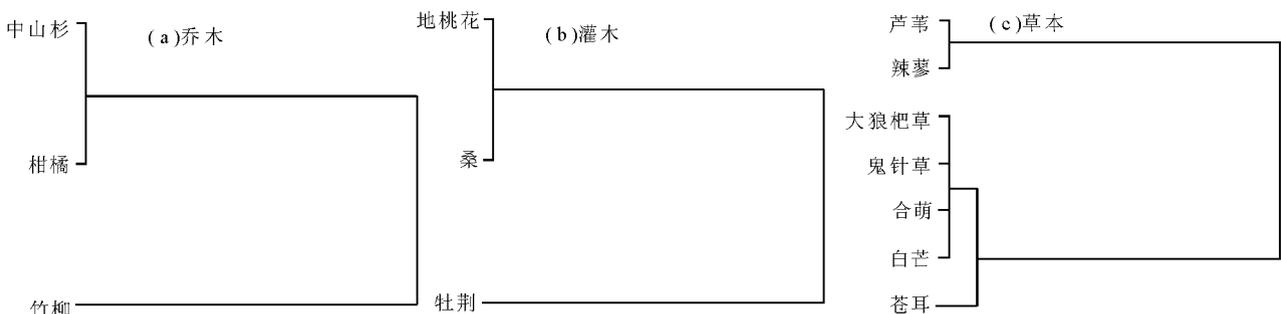


图 3 测试植物单位土地面积固碳释氧能力聚类分析

Fig.3 Cluster analysis of the 13 plant species based on the carbon fixation and oxygen release capabilities per unit land area

中山杉、柑橘为二级,其固碳量为 10.69~13.89 g/(m²·d),释氧量为 7.77~10.10 g/(m²·d)。3种灌木的单位土地面积固碳释氧能力分成两级,牡荆为一级,其固碳量为 65.47 g/(m²·d),释氧量为 47.62 g/(m²·d);地桃花、桑为二级,其固碳量为 17.21~26.10 g/(m²·d),释氧量为 12.52~18.98 g/(m²·d)。7种草本的单位土地面积固碳释氧能力分成两级,芦苇、辣蓼为一级,其固碳量为 55.54~57.51 g/(m²·d),释氧量为 40.39~41.83 g/(m²·d);苍耳为二级,其固碳量为 28.68 g/(m²·d),释氧量为 20.86 g/(m²·d);大狼把草、鬼针草、合萌、白芒为三级,其固碳量为 6.15~14.76 g/(m²·d),释氧量为 4.48~10.74 g/(m²·d)。

3 讨论

3.1 测试植物净光合速率的日变化规律

目前,不同学者对不同区域、不同环境下植物的固碳释氧能力已经进行了大量研究(刘嘉君等,2011;熊向艳等,2014;刘雪莲等,2016;邵永昌等,2016)。本研究针对目前三峡库区消落带植物固碳释氧能力研究的不足,选取了库区消落带生态修复示范工程中应用频率高、生长良好和景观效果俱佳的13种典型植物,对其固碳释氧能力进行测定和分析,研究结果具有一定的科学应用价值。从结果来看,不同植物净光合速率日变化表现出不同规律,除大狼把草、白芒、鬼针草、苍耳4种草本植物外,其余9种供试植物基本表现出早晚低、午间前后高的特点,这与刘雪莲等(2016)的研究结果一致。这是因为早上和傍晚太阳辐射较低,植物叶片可利用的太阳能较少,净光合速率降低,午间前后植物又由于可利用的太阳能充足,叶片光合器官具有较高的活性,其净光合速率较高。

除桑、白芒、辣蓼外,其他植物的净光合速率日变化均表现为双峰曲线,存在明显的“光合午休”现象,此现象是由于强光、温度过高导致空气湿度下降,造成蒸腾急剧上升,植物为了保持体内水分平衡,保护性减小气孔开张度,甚至关闭,从而影响到植物对CO₂的吸收,致使净光合速率下降(刘嘉君等,2011;王海湘等,2017)。本研究认为引起这种现象的主要原因是三峡库区夏季的强光、高温、伏旱等环境因子引起的气孔部分关闭或光抑制发生或者是叶片光合器官功能受到损害所致,这与邵永昌等(2016)、王海湘等(2017)的研究结果一致。下一步

研究将深入量化探讨固碳释氧效应与环境影响要素之间的关系;同时,不同植物的净光合速率日变化的峰值时间不同,说明13种植物的光合作用对自然环境因子的响应具有一定的差异性。

3.2 测试植物光合固碳释氧能力特征

不同生境条件下植物的固碳释氧能力差异较大。本研究中,13种常见的三峡库区消落带植物的光合固碳释氧能力均高于刘雪莲等(2016)和郝鑫杰等(2017)的研究结果;而测试植物中,除乔木外,灌木和草本固碳释氧能力均高于熊向艳等(2014)的研究结果。这可能与测试时间、测试的乔木、灌木、草本的种类和数量及植物所处环境条件等有关;另外,影响固碳释氧能力的植物自身因素主要有植物种类、株龄、叶位等,故具体植物种类的固碳释氧能力差异较大(刘嘉君等,2011;郝鑫杰等,2017)。本研究结果表明,乔木中的竹柳、灌木中地桃花、草本中的鬼针草、合萌等单位叶面积的固碳释氧能力较强。净光合速率和叶面积指数是决定单位土地面积植物固碳释氧量的重要因素(王宝琦等,2014);乔木竹柳、灌木牡荆、草本芦苇和辣蓼等单位土地面积的固碳释氧能力较其它植物要高,是因为其叶面积指数远远高于其它植物。因此,建议在三峡库区消落带植物修复过程中,在充分考虑植物的固碳释氧的生态效益时,应选择如竹柳、牡荆、地桃花、芦苇、辣蓼、鬼针草、合萌等固碳释氧能力较强的植物;考虑到聚类分析中同一级的树种具有一定的生态相似性,在三峡库区消落带生态修复工程进行植被选择配置过程中,应把固碳释氧能力相似的植物合理搭配,构建多层复合配置的“林-灌-草”模式(Schmitt-harsh et al,2013),不仅可以提高整个植被系统的固碳释氧能力,还能提高库区消落带生态环境效益。

本研究分析了三峡库区消落带13种常见植物净光合速率日变化规律及光合固碳释氧能力特征,供试植物的净光合速率日变化出现了双峰曲线,即存在“光合午休”现象,不同植物光合固碳释氧能力存在明显差异。由于研究时间仅为夏季,并未能完全表征库区消落带植物年周期内的固碳释氧生态效益。因此,还需要进一步研究其他季节的固碳释氧能力特征;另外,植物光合固碳释氧能力强弱也受限于自然环境因子的变化,未来可以通过探讨自然环境因子,如CO₂浓度、光照强度、温度等与固碳释氧能力之间的关系,深入了解植物的光合固碳释氧机制,以便更大程度上提高消落带植被生态修复工程措施的生态环境效益。

参考文献

- 陈芳清,郭成圆,王传华,等,2008.水淹对秋华柳幼苗生理生态特征的影响[J].应用生态学报,19(6):1229-1233.
- 陈月华,廖建华,覃事妮,2012.长沙地区19种园林植物光合特性及固碳释氧测定[J].中南林业科技大学学报,32(10):116-120.
- 郭晖,周慧,张家洋,2017.郑州市15种常见园林树种固碳释氧能力分析研究[J].西北林学院学报,32(4):52-56.
- 郝鑫杰,李素英,王继伟,等,2017.呼和浩特13种绿化植物固碳释氧效率的比较研究[J].西北植物学报,37(6):1196-1204.
- 华建峰,韩路弯,王芝权,等,2017.完全淹水解除后‘中山杉407’生长及光合特性的恢复[J].南京林业大学学报(自然科学版),41(5):191-196.
- 揭胜麟,樊大勇,谢宗强,等,2012.三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征[J].生态学报,32(6):1723-1733.
- 李昌晓,钟章成,刘芸,2005.模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响[J].生态学报,8(25):1953-1959.
- 李海梅,何兴元,王奎玲,等,2007.沈阳城区五种乔木树种的光合特性[J].应用生态学报,18(8):1709-1714.
- 刘嘉君,王志刚,阎爱华,等,2011.12种彩叶树种光合特性及固碳释氧功能[J].东北林业大学学报,39(9):23-25.
- 刘雪莲,何云玲,张淑洁,等,2016.昆明市常见绿化植物冬季固碳释氧能力研究[J].生态环境学报,25(8):1327-1335.
- 罗芳丽,2007.三峡库区几种陆生植物对水淹的光合及生长响应[D].重庆:西南大学.
- 罗芳丽,曾波,陈婷,等,2007.三峡库区岸生植物秋华柳对水淹的光合和生长响应[J].植物生态学报,31(5):910-918.
- 罗芳丽,曾波,叶小齐,等,2008.水淹对三峡库区两种岸生植物秋华柳(*Salix variegata* Franch)和野古草(*Arundinella anomala* Steud)水下光合的影响[J].生态学报,28(5):1964-1970.
- 邵永昌,庄家尧,王柏昌,等,2016.上海地区主要绿化树种夏季光合特性和固碳释氧能力研究[J].安徽农业大学学报,43(1):94-101.
- 苏维词,2004.三峡库区消落带的生态环境问题及其调控[J].长江科学院院报,21(2):32-34.
- 王宝琦,刘志理,戚玉娇,等,2014.利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态[J].生态学报,34(8):1956-1964.
- 王海湘,徐超,温国胜,等,2017.5种常见水土保持树种的气体交换特性研究[J].热带亚热带植物学报,25(6):531-538.
- 王丽勉,秦俊,高凯,等,2007.室内植物的固碳放氧研究[C].//中国园艺学会观赏园艺专业委员会年会,河北保定:579-581.
- 王忠君,2010.福州植物园绿量与固碳释氧效益研究[J].中国园林,(12):1-6.
- 熊向艳,韩永伟,高馨婷,等,2014.北京市城乡结合部17种常用绿化植物固碳释氧功能研究[J].环境工程技术学报,4(3):248-255.
- 胥焘,王飞,郭强,等,2014.三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析[J].环境科学,35(4):1502-1508.
- 张娇,李海明,施拥军,等,2012.30种平原绿化乔木树种光合固碳特性分析[J].西南林业大学学报,32(6):6-12.
- 张艳丽,费世民,李智勇,等,2013.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,33(12):3878-3887.
- 张一弓,张荟荟,付爱良,等,2012.植物固碳释氧研究进展[J].安徽农业科学,40(18):9688-9689.
- 赵莹,李海梅,2009.11种地被植物固碳释氧与降温增湿效益研究[J].江西农业学报,21(1):44-47.
- 朱燕青,2013.常见灌木固碳释氧及降温增湿效应研究[D].长沙:中南林业科技大学.
- 庄大伟,孔斌,王小青,等,2014.草坪和地被植物的叶面积指数研究[J].山东林业科技,44(2):72-73.
- New T, Xie Z Q, 2008. Impacts of large dams on riparian vegetation: applying global experience to the case of China's Three Gorges Dam[J]. Biodiversity and Conservation, 13(17): 3149-3163.
- Pataki D E, Alig R J, Fung A S, 2006. Urban ecosystem-sand the North American carbon cycle [J]. Global Change Biology, 11(12): 2092-2102.
- Schmitt-harsh M, Mincey S K, Patterson M, et al, 2013. Private residential urban forest structure and carbon storage in a moderate-sized urban area in the Midwest, United States[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 12(4): 454-463.
- Yu L, Ong B H, 2003. Diurnal photosynthesis and carbon economy of *Acacia mangium* [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 27(5): 624-630.

(责任编辑 万月华)

Carbon Fixation and Oxygen Release Capabilities of Common Plants in the Water-level-fluctuation Zone of Three Gorges Reservoir

FENG Jing-hong, LIU De-fu, WU Geng-hua, LIU Yu, QIN Dong-xu, WANG Ke-jian, LIU Ying

(School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Key Laboratory of Ecological Remediation of Lakes & Rivers and Algal Utilization of Hubei Province, Wuhan 430068, P.R.China)

Abstract: Carbon fixation and oxygen release (CFOR) are important ecological services provided by plants. In order to mitigate the environmental impacts resulting from dam construction, it is necessary to investigate the CFOR capabilities of plants in the water-level-fluctuation zone of reservoirs. In this study, we analyzed the CFOR capacity of 13 common plant species inhabiting the water-level-fluctuation zone of Three Gorges Reservoir by measuring the net photosynthetic rate and leaf area index of each species. The CFOR capacity of the different plant species were then ranked based on the results. The 13 species tested include three trees, three shrubs and seven herbs, distributed at elevations of 155 m, 165 m and 175 m in the fluctuation zone. The investigation was carried out in July, 2017, from the Kaizhou district to the Wanzhou district of Three Gorges Reservoir. The range of net photosynthetic rates among the 13 species was 2.36 – 11.11 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The diurnal curves of net photosynthesis rate for *Morus alba*, *Miscanthus sinensis* and *Polygonum hydropiper* displayed one-peak, while the curves for *Taxodium* ‘Zhongshanshan’, *Salix* sp., *Citrus reticulata*, *Vitex negundo* var. *cannabifolia*, *Urena lobata*, *Xanthium sibiricum*, *Phragmites australis*, *Bidens frondosa*, *Bidens pilosa* and *Aeschynomene indica* displayed two-peaks. The range of leaf area indices was 0.43 – 6.58 and followed the order, trees > shrubs > herbs. The ranges of daily net assimilation rate, carbon fixation and oxygen release capabilities per unit leaf area were, respectively, 90.28 – 410.20 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 3.18 – 14.44 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ and 2.31 – 10.50 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. The daily carbon fixation and oxygen release capabilities per unit land area were 6.15 – 65.47 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ and 4.48 – 47.62 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. Cluster analysis shows that the three trees and three shrubs fell into two groups by CFOR capabilities per unit leaf area and the seven herbs fell into three groups. The trees, shrubs and herbs all divided into two levels according to their CFOR capabilities per unit land area. The species with the highest carbon fixation and oxygen release capabilities were *Salix* (tree), *Vitexnegundo* var. *cannabifolia* and *Urenalobata* (shrubs), and *Phragmites australis*, *Polygonum hydropiper* and *Bidens pilosa* (herbs). For ecological restoration projects along the shoreline of Three Gorges Reservoir, we suggest a complex arbor-shrub-herb pattern, based on CFOR abilities, which will enhance CFOR by the system and improve the eco-environmental services provided by the reservoir area. This study provides a reference for selecting plants and evaluating the benefits of ecological restoration projects in the water-level-fluctuation zone of Three Gorges Reservoir.

Key words: carbon fixation and oxygen release (CFOR); water-level-fluctuation zone; adaptable plants; ecological restoration; Three Gorges Reservoir