

三峡库区消落带典型植物光合固碳能力及影响因素

冯晶红, 刘 瑛, 肖衡林, 刘 煜, 吴耕华, 王可健

(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, 武汉 430068)

摘 要:为了探究三峡库区消落带湿地生态系统植被的光合固碳特性及其碳汇潜力,选取 15 种典型植物,测定并量化分析了植物的光合固碳能力,并对其与主要环境生理影响因子、叶片氮磷生态学计量特征的相关性进行了分析。结果表明:(1) 15 种典型植物净光合速率基本上均与光合有效辐射、蒸腾速率及气孔导度等呈显著或极显著的正相关,与胞间 CO_2 浓度呈显著或极显著的负相关;(2) 不同生活型植物的全氮与同尺度区域的植物叶片氮素含量相当,磷含量要高于其他同尺度区域,而不同生活型植物的日平均光合速率与叶片全氮、全磷及氮磷比之间相关性不显著;(3) 不同类型植物日光合净同化量、单位叶面积固碳量及单位土地面积固碳量均不相同,乔木中的竹柳,灌木中的牡荆、地桃花,草本中的芦苇、辣蓼的固碳能力较强。综合分析,在三峡库区消落带生态修复工程中应着重选择竹柳、地桃花、芦苇、辣蓼等高效固碳植物并进行合理配植,构建多层复合配置的林灌草的模式,从而改善库区消落带生态问题。

关键词:三峡库区消落带; 碳汇; 光合固碳

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0305-07

Photosynthesis and Carbon Sequestration Characteristics of Typical Plants and Their Influencing Factors in Reservoir Riparian Region of Three Gorges Reservoir

FENG Jinghong, LIU Ying, XIAO Henglin, LIU Yu, WU Genghua, WANG Kejian

(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, China)

Abstract: In order to explore the vegetation characteristics of photosynthetic carbon sequestration and carbon sequestration potential of wetland ecosystem in the Three Gorges Reservoir area, 15 species of typical plants in the water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir in Chongqing were selected as the research samples to analyze their property of photosynthetic and carbon sequestration. The daily carbon sequestration capacity was quantitatively calculated. And then the correlation between photosynthesis and the main physiological environment factors and the stoichiometric characteristics of nitrogen (N), phosphorus (P) in leaves were analyzed. The results show that: (1) the total nitrogen of plant leaf among the tested plant types is equivalent to that on the regional scale, but the phosphorus content is much higher, and there is no correlation between the average photosynthetic rate and leaf total nitrogen and total phosphorus; (2) there is a significant or extremely significant positive correlation between the net photosynthetic rate and photosynthetic active radiation, transpiration rate and stomatal conductance, but a significant or extremely significant negative correlation with intercellular CO_2 concentration; (3) different types of plants have different assimilation amounts of sunlight, carbon sequestration amount per unit leaf area and carbon sequestration amounts per unit land area; with respect to the carbon sequestration ability, *Salix* sp., *Vitex negundo* var. *cannabifolia* and *Urena lobata*, *Phragmites australis* and *Polygonum hydropiper* have the higher abilities of carbon

收稿日期:2019-01-21

修回日期:2019-03-02

资助项目:国家重点研发计划“西南水电高坝大库梯级开发的生态保护与恢复技术”(2016YFC0502208);国家自然科学基金青年项目(31500577)

第一作者:冯晶红(1988—),女,湖北荆州人,在读博士,讲师,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(1983—),女,山西长治人,副教授,主要从事水土保持及河流生态修复方向研究。E-mail:lycg06@163.com

sequestration. In the ecological restoration project of the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir Area, we should select some vegetation with high efficient and potential carbon sinks, such as *Salix*, *Urena lobata*, *Phragmites australias* and *Polygonum hydropiper*, and so on, and to build multi-layer mixed community, as well as to solve the ecological problems of the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir Area.

Keywords: water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir; carbon sink; photosynthetic and Carbon Sequestration

水库消落带又称涨落带或涨落区,指的是水库季节性水位涨落而使周边被淹没土地周期性地出露于水面的一段特殊区域^[1-2],是水生生态系统和陆生生态系统交替控制的过渡地带,是一类特殊的湿地生态系统^[3],在控制陆地生态系统碳循环中扮演着重要的角色,即湿地可以从大气中吸收二氧化碳并固定成为碳库,同时又向大气中排放 CH_4 ,成为碳源^[4]。据研究表明,三峡水库消落带出露面积达 $437 \sim 446 \text{ km}^2$,如此大面积的消落带植被吸收了大量 CO_2 ,其积累的生物质是宝贵的资源^[3-5]。因此,需要重视三峡水库消落带湿地植被作为碳库在储存有机碳中的重要作用。

植物作为碳库在储存有机碳中发挥着重要作用,主要体现在植物具有固碳释氧的重要功能,即通过光合作用吸收二氧化碳和释放氧气^[6],对调节区域碳平衡起着重要的作用^[7]。目前对于湿地生态系统植物固碳能力方面,国内外学者已经开展了广泛而深入的研究。Crill^[8]等通过对北方泥炭地湿地植物的研究,得出其固碳能力约为 $0.31 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;Aselmann^[9]等通过研究认为全球湿地植物的平均固碳能力为 $0.05 \sim 1.35 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;我国许多学者也对不同类型湿地生态系统的植被的储碳和固碳能力进行了研究^[10-11],而鲜有对于消落带这类特殊湿地植被的储碳和固碳能力的研究。基于以上考虑,本研究拟从不同植物光合特性和固碳能力的角度出发,选取了三峡库区消落带地区 15 种典型适生植物,对其光合固碳能力进行分析比较,定量化探究三峡库区消落带优势植物的光合固碳能力,同时对光合固碳能力的关键性指标净光合速率的内外影响因子进行相关分析,为三峡库区消落带生态恢复植物筛选和高效碳汇植物配置提供科学依据,同时为其他大型水库应对碳循环问题提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验样地位于重庆三峡库区开州区至万州区段人工恢复消落带。位于长江上游下段,全区地处中纬度,属湿润亚热带季风气候,多年平均气温 $15 \sim 18^\circ\text{C}$,多年平均降雨量为 $1\,150.26 \text{ mm}$,表现出明显

的年、季变化。土壤类型主要有水稻土、黄壤、石灰土、紫色土等。植被是一年生草本为主的草丛植被类型,灌丛植被分布较少,且仅有少量乔木幼树或萌生枝条,主要有狗牙根(*Cynodon dactylon*)、辣蓼(*Polygonum hydropiper*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、芦竹(*Arundo donax*)、大狼把草(*Bidens frondosa*)、黄荆(*Vitex negundo*)、桑(*Morus alba*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、垂柳(*Salix babylonica*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)等。

1.2 试验材料

试验选取从开州区渠口镇至万州区石宝寨人工恢复消落带区段作为试验样地。该区每年 10 月至次年 1 月高水位运行(水位高于海拔 170 m),于 6 月至 8 月低水位运行(水位低于海拔 150 m)。为了减少地形地貌、水位波动及气候变化等因素对植被光合作用的影响,在植物正处于夏季旺盛生长季(7 月下旬)开展调查研究。根据植物群落组成特征,选取了近自然状态的 15 种典型消落带适生植物,分别为中山杉(*Taxodium 'Zhongshanshan'*)、竹柳(*Salix sp*)、柑橘(*Citrus reticulata*)、苧麻(*Boehmeria nivea*)、牡荆(*Vitex negundo var. cannabifolia*)、桑(*Morus alba*)、地桃花(*Urena lobata*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)、风车草(*Cyperus alternifolius*)、芦苇(*Phragmites australias*)、白芒(*Miscanthus sinensis*)、大狼把草(*Bidens frondosa*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、合萌(*Aeschynomene indica*)、辣蓼(*Polygonum hydropiper*),隶属于 12 科,分为 3 种生活型:乔木 3 种、灌木 4 种、草本 8 种。

2 试验方法

2.1 植物光合速率和叶面积指数的测定

植物光合速率测定采用 SY-1020 便携式光合仪。于 2017 年 7 月 20 日至 7 月 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 $8:00 \sim 18:00$ 每隔 2 h 测定 1 次,并同步测定空气气温(T_a)、叶片温度(T_L)、叶室湿度(RH)、光合有效辐射(PAR)、蒸

腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和 WUE(水分利用率)等参数。测定时每种植物选择具有代表性的 3 株植株,每次每株植物选择向阳的大小相近、长势较好的功能叶 4~6 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 株样本的平均值,各个时间段内测定树种的顺序保持不变。

利用 S-120 型便携式叶面积测量仪对所选植物的叶面积进行测定。每种植物选取 3 株具有代表性的样株,每株植物测量 6 片单叶,并取其均值作为该种植物的单叶叶面积,同时采用标准枝法调查整株叶量,进而获得整个调查植株的叶片总面积(Y)^[12]。植物的冠幅大小(S)用皮尺测定,其中乔木和灌木选取 4 株样株测定其冠幅大小,取平均值,草本植被覆盖面积以 $1 \times 1 \text{ m}^2$ 样方计数。每种植物单株叶面积指数(leaf area index,简称 LAI)计算公式^[6]为:

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

2.2 日净同化总量和固碳能力的计算及分析方法

利用简单积分法计算测试植物在测定当日的净同化量^[13-14],计算公式为:

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

式中: P 为测定日单位叶面积的净同化总量 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; 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 [$\text{umol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; 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。

一般植物晚上的暗呼吸消耗量按照白天同化量的 20% 计算^[15],则单位叶面积日净固定 CO_2 量按照以下公式计算:

$$W_{CO_2} = p \times (1 - 0.2) \times 44 / 100 \quad (3)$$

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

测试植物在测定当日单位土地面积上每天吸收 CO_2 按照以下公式计算:

$$Q_{CO_2} = W_{CO_2} \times LAI \quad (4)$$

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

2.3 叶片氮磷含量的测定

叶片样品自野外带回实验室后进行杀青,烘干处理,然后对叶片营养元素进行测定。叶片全氮含量利用凯氏定氮仪(FOSS 2200,瑞典);植物叶片全磷含量采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮—钼锑抗比色法测定的^[16]。其中 TN,TP 定义为单位重量叶片的全氮、全磷含量。

2.4 数据分析

利用 SPSS 22.0 数理统计软件对数据进行相关分析和方差分析。不同生活型植物叶片光合特性与影响因素及叶片养分含量之间的关系采用 Pearson 相关分析法。

3 结果与分析

3.1 净光合速率与主要环境生理因素相关性分析

见表 1,不同植物净光合速率对自然环境因子的响应不相同。15 种植物的净光合速率与光合有效辐射(PAR)、蒸腾速率(T_r)及气孔导度(G_s)等呈正相关,且大部分测试植物的净光合速率与光合有效辐射(PAR)、蒸腾速率(T_r)及气孔导度(G_s)呈显著($p < 0.05$)或($p < 0.01$)极显著的正相关。而测试植物的净光合速率与胞间 CO_2 浓度(C_i)呈负相关,且部分植物呈显著($p < 0.05$)或($p < 0.01$)极显著的负相关。

测试的大部分植物的净光合速率与气温(T_a)、叶片温度(TL),叶室湿度(RH)以及水分利用(WUE)成正相关,并且部分植物的净光合速率基本上与气温(T_a)、叶片温度(TL),叶室湿度(RH)以及水分利用(WUE)呈显著($p < 0.05$)或($p < 0.01$)极显著的正相关;而苎麻、白芒、大狼把草及鬼针草的净光合速率则与气温(T_a)、叶片温度(TL),叶室湿度(RH)以及水分利用(WUE)呈负相关,其中白芒及大狼把草净光合速率则与气温(T_a)、叶片温度(TL)呈显著($p < 0.05$)或($p < 0.01$)极显著的负相关。

3.2 植物叶片的日平均光合速率与叶片氮、磷含量的相关性分析

3.2.1 不同生活型植物日平均光合速率与叶片 N,P 含量分析 氮磷对植物光合作用及碳分配有着显著的影响^[17],故而影响植物光合固碳能力。由表 2 看出,不同生活型植物的日平均光合速率、叶片氮、磷的组成均有所不同。3 种乔木的日平均光合速率、叶片氮含量、叶片磷含量及叶片氮磷含量比分别在 $2.36 \sim 10.72 \text{ } \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $17.2 \sim 19.87 \text{ mg/g}$, $1.66 \sim 6.9 \text{ mg/g}$, $2.49 \sim 11.25$ 之间,4 个指标中,竹柳相对较高,柑橘相对较低。4 种灌木日平均光合速率、叶片氮含量、叶片磷含量及叶片氮磷含量比分别在 $4.71 \sim 10.46 \text{ } \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $22.06 \sim 28.61 \text{ mg/g}$, $2.05 \sim 5.27 \text{ mg/g}$, $4.18 \sim 13.95$ 之间,4 个指标中,地挑花相对较高,苎麻相对较低。8 种草本日平均光合速率、叶片氮含量、叶片磷含量及叶片氮磷含量比分别在 $4.16 \sim 11.11 \text{ } \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $9.18 \sim 38.76 \text{ mg/g}$, $1.47 \sim 9.5 \text{ mg/g}$, $2.96 \sim 10.15$ 之间,4 个指标中,鬼针草相对较高,风车草相对较低。

表 1 不同树种净光合速率与影响因子相关性

植物类型	植物名称	气温 Ta	叶片 温度 TL	叶室 温度 RH	光合有效 辐射 PAR	蒸腾 速率 Tr	气孔 导度 Gs	胞间 CO ₂ 浓度 Ci	水分利用 率 WUE
乔木	水杉	0.064	0.098	0.079	0.357	0.542**	0.475*	−0.277	−0.150
	竹柳	0.168	−0.128	−0.171	0.533**	0.536**	0.487*	−0.056	−0.347
	柑橘	0.451*	0.100	0.418*	0.780**	0.169	0.052	−0.089	0.069
	苎麻	−0.314	−0.332	0.557**	0.138	0.092	0.043	−0.538**	0.340
灌木	牡荆	0.502*	0.496*	0.717**	0.858**	0.678**	0.566**	0.151	−0.074
	地桃花	0.286	0.080	−0.564**	0.426*	0.660**	0.689**	−0.224	−0.608**
	桑	0.749**	0.525**	0.716**	0.839**	0.199	0.066	−0.281	0.390
	苍耳	0.571**	0.496*	0.916**	0.879**	0.314	0.329	−0.840**	0.595**
草本	风车草	0.138	0.090	0.079	0.518**	0.569**	0.543**	−0.274	0.172
	芦苇	0.308	0.159	0.505*	0.710**	0.779**	0.731**	−0.108	−0.365
	白芒	−0.257	−0.492*	0.587**	0.440*	0.402	0.254	0.078	0.564**
	大狼把草	−0.605**	−0.489*	0.681**	0.202	0.044	0.008	−0.629**	0.733**
	鬼针草	−0.033	−0.095	0.031	0.538**	0.385	0.516**	−0.501*	0.523**
	合萌	0.556**	0.210	−0.361	0.420*	0.163	0.175	−0.662**	0.640**
	辣蓼	0.782**	0.779**	−0.550**	0.648**	0.739**	.681**	−0.606**	−0.200

注：“*”在 0.05 水平上显著相关。“**”在 0.01 水平上显著相关。

表 2 植物的日平均光合速率和叶片氮、磷含量计量学特征

植物名称(生活型)	$\overline{p}/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	TN/(mg · g ^{−1})	TP/(mg · g ^{−1})	TN/TP
水杉	2.90±0.99a	17.28±0.55gh	6.96±0.23b	2.49±0.16a
竹柳	10.72±2.59d	19.89±0.65f	2.14±0.2fg	9.32±0.57e
柑橘	2.36±1.22a	18.73±0.37fg	1.64±0.14h	11.48±0.8f
乔木平均值	5.33	18.6	3.55	7.74
苎麻	4.71±2.56ab	28.6±0.94cd	2.06±0.1fg	13.89±0.25g
牡荆	7.52±2.93bcd	23.02±0.36e	2.63±0.28ef	8.83±0.82e
地桃花	10.46±2.53d	22.05±1.08e	5.29±0.23d	4.18±0.39abc
桑	8.12±2.16bcd	26.59±2.19d	2.64±0.56ef	10.31±1.88ef
灌木平均值	7.70	24.59	3.15	9.06
苍耳	8.88±5.42cd	38.71±0.93a	5.91±0.71c	6.6±0.65d
风车草	4.16±2.59ab	15.59±0.75hi	1.59±0.13h	9.88±1.28ef
芦苇	7.75±3.22bcd	9.15±1.43j	1.84±0.21h	4.97±0.21cd
白芒	6.11±3.57abc	9.34±0.26j	1.65±0.08h	5.68±0.44cd
大狼把草	9.05±4.01cd	28.14±1.68cd	9.49±0.85a	2.97±0.09ab
鬼针草	11.11±3.09d	30.23±1.95bc	6.99±0.35b	4.34±0.5bc
合萌	10.89±2.31d	31.18±1.81b	3.08±0.17e	10.16±1.16ef
辣蓼	8.99±3.70cd	13.93±1.19i	1.45±0.24h	9.85±2.48ef
草本平均值	8.37	22.05	4.02	6.73

注：同列中的不同字母表示各参数在不同植物之间具有显著差异($p<0.05$)。

3.2.2 植物日平均光合速率与叶片氮、磷含量的相关性分析 植物叶片细胞中氮磷浓度及氮磷比与光合速率密切相关^[17]。由表 3 分析可知,不同生活型植物叶片日平均光合速率与叶片全氮、全磷及氮磷比之间的关

系存在差异。乔木叶片和草本叶片的日平均光合速率与叶片全氮、全磷及氮磷比之间相关性均不显著,而灌木叶片的日平均光合速率与叶片全氮、全磷的相关性均不显著,与氮磷比之间呈显著负相关。

表 3 不同生活型日平均光合速率与叶片氮、磷含量的相关性分析			
植物类型	\bar{p} 与 TN	\bar{p} 与 TP	\bar{p} 与 TN/TP
乔木	0.787	-0.380	0.270
灌木	-0.916	0.879	-0.979*
草本	0.631	0.514	-0.188

注:“*”相关性在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

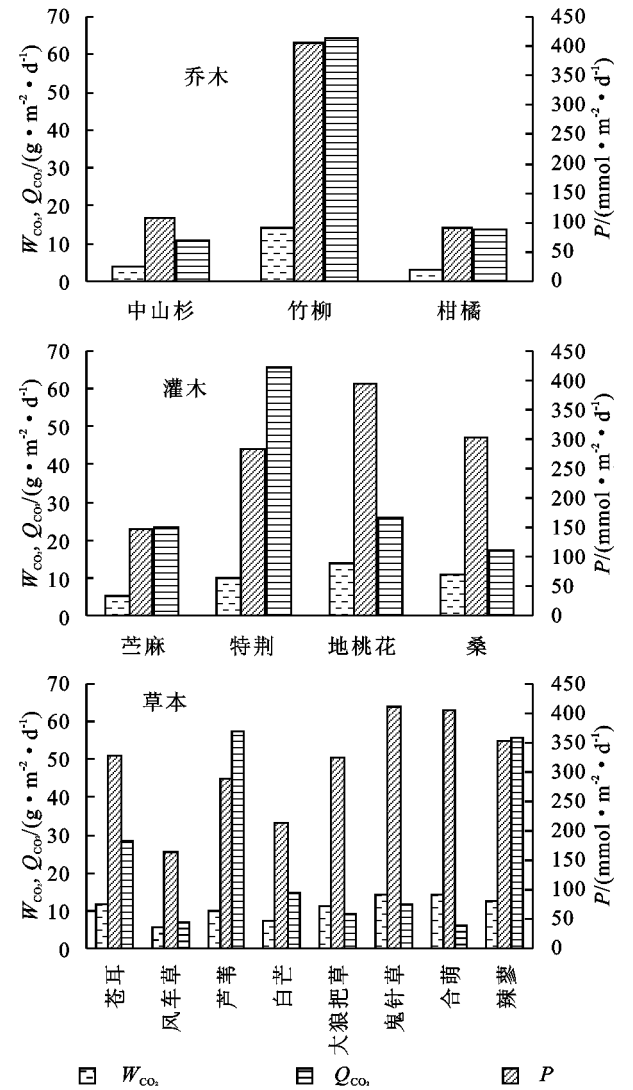
3.3 固碳释氧能力分析

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,固碳能力越大^[18]。由图 1 可知,不同类型植物日光合净同化量、单位叶面积固碳量及单位土地面积固碳量均不相同,但同一植物日光合净同化量、单位叶面积固碳量变化趋势相同,而单位土地面积植物固碳量受叶面积指数的影响,变化趋势略有差异,乔木中,竹柳的日光合净同化、单位叶面积固碳量及单位土地面积固碳量均最高,分别为:405.17 mmol/(m²·d),14.26 g/(m²·d),64.46 g/(m²·d);灌木中,牡荆的日光合净同化、单位叶面积固碳量及单位土地面积固碳量相对较高,分别为:282.68 mmol/(m²·d),9.95 g/(m²·d),65.47 g/(m²·d),其次为地桃花。草本中,鬼针草、合萌相较于具有较高的日光合净同化、单位叶面积固碳量,分别为:410.20 mmol/(m²·d)和 14.44 g/(m²·d),406.63 mmol/(m²·d)和 14.31 g/(m²·d),受叶面积指数影响,芦苇和辣蓼日光合净同化、单位叶面积固碳量虽较鬼针草、合萌低,但其叶面积指数相对较高,其单位土地面积固碳量相对较高,分别为:57.51 g/(m²·d),55.54 g/(m²·d)。

4 讨论与结论

(1) 植物的光合作用是非常复杂的内部生理过程,净光合速率的大小通常作为反映了植物固碳释氧能力的强弱^[19],评价内因与外因对光合作用影响程度的指标^[20],而净光合速率受外界环境因子影响较大。在净光合速率与外界多变的环境因素与植物生理因素相关性分析中,测试的 15 种植物中,苎麻、白芒、大狼把草及鬼针草的净光合速率则与气温、叶片温度,叶室湿度以及水分利用呈负相关,其中白芒及大狼把草净光合速率则与气温、叶片温度呈显著($p<0.05$)或($p<0.01$)极显著的负相关,这与邵永昌^[21]、王海湘^[22]等的研究结果不同,究其原因,可能因为测定时间段内温度过高减弱了植物光合碳同化过程。试验所测的大多数植物的净光合速率与光合

有效辐射、蒸腾速率及气孔导度等呈显著($p<0.05$)或($p<0.01$)极显著的正相关,仅少数种类植物的净光合速率与气孔导度无关,可能由于测定时间段内温度过高,植物处于高温胁迫状态,使得其非气孔限制因子对光合作用的影响占主导地位^[23];而测试植物的日平均光合速率与胞间 CO₂ 浓度呈显著($p<0.05$)或($p<0.01$)极显著的负相关,这与邵永昌^[21]、吴芹^[24]的研究结果一致。说明一定程度内,光合有效辐射、气孔导度、蒸腾速率的变化及胞间 CO₂ 浓度是影响植物叶片光合速率大小的主要因素,从而影响其固碳能力。故而在开展植物生态修复工程中,应保持适当种植距离,以增强植被采光及通风效果,从而提高植物的固碳能力。



注: P 为测定日单位叶面积的净同化总量; W_{CO_2} 为测定日单位叶面积的净固定 CO₂ 的质量; Q_{CO_2} 为测定日单位土地面积的净固定 CO₂ 的质量。

图 1 15 种植物日光合净同化量、单位叶面积固碳量和单位土地面积固碳量

(2) 消落带湿地系统作为物质转换的重要动态

中心,其他元素的输入和转化对碳循环动态也产生着重要影响^[4],尤其以氮磷对植物光合固碳能力及碳分配有着显著的影响。试验测得的不同生活型的植被的全氮含量平均值分别为:18.6 mg/g,24.59 mg/g,22.05 mg/g,高于三峡库首地区的氮含量(18.3 mg/g),与同尺度区域的植物叶片氮素含量相当^[25-27];不同生活型的植被的全磷含量平均值分别为 3.55 mg/g,3.15 mg/g,4.02 mg/g,而磷含量要高于其他同尺度区域^[26,28],这表明,重庆三峡库区消落带植物体内氮磷含量较为富足。同时,试验测得的不同生活型的植被的日平均光合速率均高于其他地区^[29]。此结果可以通过以下假说来解释:在淹水生境下维持相对高的光合速率以及叶片营养元素对于植物存活是非常关键的^[30]。通过对不同生活型植物的日平均光合速率与叶片全氮、全磷之间相关性分析结果显示两者显著性并不明显,而在与叶片氮磷比相关性方面,灌木的日平均光合速率与叶片氮磷比呈显著负相关,可能因为在库区消落带氮磷供给充足的前提下,叶片磷供给量过多时,使得地上部分生物量积累受到限制^[31];同时,也可能与土壤环境有关,土壤对植物的叶片氮磷含量变化有显著影响,本研究未就土壤因子对植物叶片氮磷含量的影响进行研究,或许会忽略土壤环境对植物固碳功能的限制影响^[32],需继续深入开展研究。

(3) 固碳能力是反映植物光合作用的重要指标。净固碳量高说明植物与外界交换的 CO_2 和 O_2 较多,可以把更多的太阳能转化成有机质储存于植物体内^[33],日光合净同化量、单位叶面积固碳量及单位土地面积固碳量均不相同。测试的 15 种植物中,乔木中的竹柳,灌木中牡荆、地桃花,具有较高的日光合净同化量、单位叶面积固碳量及单位土地面积固碳量,由于净光合速率和叶面积指数是决定单位土地面积植物固碳量的重要因素^[34],草本中的鬼针草、合萌虽然具有较高的日光合净同化量、单位叶面积固碳量,因为其叶面积指数远远低于其他植物,草本中芦苇和辣蓼等单位土地面积的固碳能力较其他植物要高。因此,本研究建议在三峡库区消落带植物修复进行植被选择过程中,在充分考虑植物的固碳的生态效益时,应选择诸如竹柳,牡荆,地桃花,芦苇,辣蓼,鬼针草,合萌等高效碳汇植物,在三峡库区消落带生态修复工程进行植被选择配植过程中,合理搭配,构建多层复合配置的林灌草的模式^[35],不仅提高整个植被系统的固碳能力,从而提高库区消落带湿地生态系统的碳汇功能。

三峡库区消落带湿地生态系统受水文机制调控,海拔变化引起的淹水持续时间、频率和水深对其原有生态系统平衡造成严重破坏,植物群落的组成与空间分布格局遭受显著影响^[36-39]。库区消落带的植被修复措施用来改善消落带生态系统逐渐成为人们关注的焦点^[40]。光合固碳作用是植物的重要生态功能之一,对于维持消落带湿地生态系统平衡具有重要的价值。而植物的光合固碳过程是一个复杂的生理过程,受到外界多变的环境因素的影响。在今后的研究中,应结合多种分析方法将这些相互联系、相互制约的影响因素综合起来,筛选具有较强固碳能力及碳储量潜能的植物类型,并考虑植物的生长适应性来优化植物配置模式。

参考文献:

- [1] 刁承泰.三峡水库水位消落带土地资源的初步研究[J].长江流域资源与环境,1999,8(1):75-79.
- [2] 涂建军,陈治谏,陈国阶,等.三峡库区消落带土地整理利用:以重庆市开县为例[J].山地学报,2002,20(6):712-717.
- [3] 苏维词,杨华,罗有贤,等.三峡库区涨落带的主要生态环境问题及其防治措施[J].水土保持研究,2003,10(4):196-198.
- [4] 袁兴中,刘红,王建修,等.三峡水库消落带湿地碳排放生态调控的科学思考[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2010,27(2):23-25.
- [5] 袁兴中,熊森,李波,等.三峡水库消落带湿地生态友好型利用探讨[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2011,28(4):23-25.
- [6] 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.
- [7] 何云玲,郭宗锋,刘雪莲.四川省老君山常绿阔叶林乔木碳储量及其分布特征[J].生态环境学报,2015,24(11):1765-1770.
- [8] Crill P M, Bartlett K B, Harriss R C, et al. Methane flux from minnesota peatlands[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1988,2(4):371-384.
- [9] Aselmann I, Crutzen P J. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1989,8(4):307-358.
- [10] 李孟颖.全球气候变化背景下湿地系统的碳汇作用研究:以天津为例[J].中国园林,2010,26(6):27-30.
- [11] 索安宁,赵冬至,张丰收.我国北方河口湿地植被储碳、固碳功能研究:以辽河三角洲盘锦地区为例[J].海洋

- 学研究,2010,28(3):67-71.
- [12] 朱燕青.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,2013.
- [13] 王忠君.福州植物园绿量与固碳释氧效益研究[J].中国园林,2010,26(12):1-6..
- [14] 郭晖,周慧,张家洋.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,2017,32(4):52-56.
- [15] 王丽勉,秦俊,高凯,等.室内植物的固碳放氧研究[C]//2007 年中国园艺学会观赏园艺专业委员会.室内植物的固碳放氧研究.北京:中国园艺学会,2007,579-581.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2007.
- [17] 王琪,徐程扬.氮磷对植物光合作用及碳分配的影响[J].山东林业科技,2005(5):59-62.
- [18] 张娇,李海明,施拥军,等.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,2012,32(6):6-12,24.
- [19] 张娜,张巍,陈玮,等.大连市 6 种园林树种的光合固碳释氧特性[J].生态学杂志,2015,34(10):2742-2748.
- [20] 黄滔,唐红,廖菊阳,等.长果安息香夏季光合蒸腾日变化与其环境因子的关系[J].中南林业科技大学学报,2015,35(7):62-68.
- [21] 邵永昌,庄家尧,王柏昌,等.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,2016,43(1):94-101.
- [22] 王海湘,徐超,温国胜,等.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,2017,25(6):531-538.
- [23] 高冠龙,冯起,张小由,等.植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述[J].干旱区研究,2018,35(4):929-937.
- [24] 吴芹,张光灿,裴斌,等.3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应[J].生态学报,2013,33(12):3648-3656.
- [25] 刘泽彬,程瑞梅,肖文发,等.三峡库区库首森林生态系统植物叶片碳氮磷化学计量特征研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2017,41(2):27-33.
- [26] 郑淑霞,上官周平.黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局[J].自然科学进展,2006,16(8):965-973.
- [27] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. New Phytologist, 2005,168(2):377-385.
- [28] 韩文轩,吴漪,汤璐瑛,等.北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征[J].北京大学学报:自然科学版,2009,45(5):855-860.
- [29] 熊向艳,韩永伟,高馨婷,等.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,2014,4(3):248-255.
- [30] Domingues T F, Meir P, Feldpausch T R, et al. Co-limitation of photosynthetic capacity by nitrogen and phosphorus in West Africa woodlands[J]. Plant Cell & Environment, 2010,33(6):959-980.
- [31] Bekele A, Hudnall W H, Tiarks A E. Response of densely stocked loblolly pine(*Pinus taeda* L.) to applied nitrogen and phosphorus[J]. Southern Journal of Applied Forestry, 2003,27(3):180-189.
- [32] 曾鸿文,温仲明,陶宇,等.延河流域 6 种草本植物功能性状变异来源分析[J].水土保持研究,2018,25(5):364-370.
- [33] 吴统贵,虞木奎,孙海菁,等.林药复合系统林下植物光合特性对生长光强的响应[J].中国生态农业学报,2011,19(2):338S-341.
- [34] 王宝琦,刘志理,戚玉娇,等.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,2014,34(8):1956-1964.
- [35] Schmitt-Harsh M, Mincey S K, Patterson M, et al. Private residential urban forest structure and carbon storage in a moderate-sized urban area in the Midwest, United States[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2013,12(4):454-463..
- [36] Touchette B W, Iannaccone L R, Turner G E, et al. Drought tolerance versus drought avoidance: A comparison of plant-water relations in herbaceous wetland plants subjected to water withdrawal and repletion[J]. Wetlands, 2007,27(3):656-667.
- [37] Casanova M T, Brock M A. How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities [J]. Plant Ecology, 2000,147(2):237-250.
- [38] 王强,袁兴中,刘红,等.水淹对三峡水库消落带苍耳种子萌发的影响[J].湿地科学,2011,9(4):328-333.
- [39] 孙荣,袁兴中,刘红,等.三峡水库消落带植物群落组成及物种多样性[J].生态学杂志,2011,30(2):208-214.
- [40] 钟荣华,吕发友,鲍玉海,等.三峡水库消落带草本植物对若干土壤物理性质的影响[J].水土保持研究,2018,25(1):17-22.