

山东半岛海岸前沿4种草本植物光合性能及资源利用效率比较

刘艳莉^{1,2}, 侯玉平², 卜庆梅², 柏新富^{2*}

(1. 鲁东大学校报编辑部, 烟台 264025; 2. 鲁东大学生命科学学院, 烟台 264025)

摘要: 为了解海岸前沿草带不同草本植物光合性能和资源利用效率的差异性, 采用TPS-2光合系统测定烟台海岸前沿草带4种草本植物砂引草、筛草、肾叶打碗花和狗牙根的光合性能指标, 以及碳素利用效率、光合氮利用效率和灰分含量等, 并用隶属函数法综合评定4种草本植物的资源利用效率综合指数。结果表明, 4种草本植物的光饱和点都较高, 均适宜在较强光照条件下生长, 其中以狗牙根的光合能力最强、砂引草最弱。同时, 狗牙根和筛草具有较高的光能利用效率和水分利用效率, 狗牙根还有较高的叶片碳利用效率和光合氮利用效率, 矿质元素利用效率则是砂引草和肾叶打碗花显著高于狗牙根和筛草。综合分析表明, 4种草本植物的资源利用效率综合指数排序从高到低为: 狗牙根、筛草、肾叶打碗花和砂引草。

关键词: 海岸带; 草本植物; 光合性能; 资源利用效率

中图分类号: Q945.79; P748

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2018)04-0710-05

Comparison of photosynthetic performance and resource use efficiency of 4 herbaceous species in coastal frontier of Shandong Peninsula

LIU Yanli^{1,2}, HOU Yuping², BU Qingmei², BAI Xinfu²

(1. Editorial Department of School Newspaper, Ludong University, Yantai 264025;

2. School of Life Sciences, Ludong University, Yantai 264025)

Abstract: This study aimed to understand the differences between the four herbs in photosynthetic performance and resource use efficiency in Yantai coastal frontier. The photosynthetic performance indicators of 4 herbs, *Messerschmidia sibirica*, *Carex kobomugi*, *Calystegia soldanella* and *Cynodon dactylon* were investigated using a TPS-2 portable photosynthesis system, and the carbon use efficiency (CUE), photosynthetic nitrogen-use efficiency (PNUE) and ash content were also determined. Additionally, a comprehensive assessment of the resource use efficiency of 4 herb species was performed with the subordinate function. The results showed that the light saturation point was relatively high in all the 4 species which are able to grow well under high light intensity. Meanwhile, *C. dactylon* showed the strongest capacity in photosynthesis, and *M. sibirica* was the weakest. In addition, the light use efficiency (LUE) and water use efficiency (WUE) were significantly higher in *C. dactylon* and *C. kobomugi* than in *M. sibirica* and *C. soldanella*, moreover, *C. dactylon* was at the top in the PNUE and CUE. In terms of the mineral use efficiency (MUE), *M. sibirica* and *C. soldanella* were significantly higher than *C. dactylon* and *C. kobomugi*. The comprehensive analysis showed that the CIR (comprehensive indices of resource use efficiency) sorted descending order: *C. dactylon* > *C. kobomugi* > *C. soldanella* > *M. sibirica*.

Key words: coastal belt; herbaceous plant; photosynthetic performance; resource use efficiency

植物生长发育除受遗传控制外, 还在很大程度上受到光照、水分供应状况、温度以及介质营养状况的影响^[1], 碳、氮、矿质元素及光能、水分等资源的利用效率在一定程度上影响着其适应和竞争力

甚至生存状况^[2]。植物的资源利用效率被定义为植物在其生命活动过程中消耗每单位资源能够将二氧化碳转变为有机物的量, 即同化碳素的量或积累的生物量^[3]。植物光合特性在很大程度上决定着植物

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770581)资助。

作者简介: 刘艳莉, 副编审。E-mail: bdy681016@163.com

* 通信作者: 柏新富, 教授。E-mail: bxf64@163.com

的资源利用效率和生长潜力。因此, 利用光合性能和资源利用效率对植物的生长和适应能力进行评价具有重要的实际意义。

沙质海岸是重要的海岸类型之一, 长期受自然与人类活动的共同影响, 沙质海岸形成了从高潮线向陆方向依次分布裸露沙滩—前沿草带—灌丛带—防护林带等生态系统组成的生态景观综合体, 并成为沙质海岸重要的生态屏障。处于海陆交界前沿由耐贫瘠、耐沙埋和耐盐碱的多年生无性系草本植物构成的草带是其不可或缺的组成部分, 承担着消潮减浪、防止海水冲刷和阻沙抑沙、防止风沙向陆入侵等重要的防护功能^[4]。但是, 由于沙质海岸基质流动性大、海潮海浪海风等驱动力强, 加之人类经济活动(采砂、兴建各类临海建筑和海产养殖加工场所等)的破坏, 海岸前沿草带破损严重, 造成海潮侵蚀海岸和风沙向陆侵袭现象, 导致沿岸农田、绿地积沙, 植被衰退。植树种草无疑是使松散易移动的沙粒保留于人类需要的范围而不“越界”危害的必由之路。目前有关海岸防护林建设及造林树种选择已有较多研究^[5-6], 而关于海岸前沿草带仅有少量沙埋方面的研究^[7]。本试验以烟台海岸前沿常见草本植物为研究对象, 对其在沙质海岸近海环境下的光合性能和资源利用效率进行比较研究, 为海岸前沿草带恢复重建的草种选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域自然条件

试验在烟台市北部套子湾海岸进行。试验区近 5 年平均年降水量、气温、相对湿度分别为 651.9 mm、11.8℃和 68%, 总辐射能年平均约为 5 224.4 MJ·m⁻², 无霜期 210 d, 属温带季风气候。

1.2 试验材料

选取海岸前沿草带 4 种草本植物砂引草 (*Messerschmidia sibirica* L.)、筛草 (*Carex kobomugi* Ohwi)、肾叶打碗花 (*Calystegia soldanella* (L.) R. Br.) 和狗牙根 (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) 的健康植株为材料。在距高潮线 10.5~12.5 m 范围内, 按平行于海岸方向将草带分为 5 个区段, 每个区段长 5 m, 每种植物每个区段均进行 1 次测定和取样, 即所有测定和取样均重复 5 次, 结果取平均值。测定和取样在 2017 年 7 月下旬的晴天上午 8:30~11:30 进行。

1.3 试验方法

1.3.1 光合指标、水分利用率和碳素利用率测定

利用可调 LED 光源控制不同强度光照 (1 800、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、

100、50 和 0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 以仪器实际测定值为准), 使用 TPS-2 型光合蒸腾测定系统 (PP system, USA) 测定记录各个光强下的净光合速率等指标, 绘制净光合速率-光照强度响应曲线, 参照 Ye^[8]的方法求最大净光合速率 (maximum net photosynthetic rate, P_{max})、光饱和点 (light saturation point, LSP)、光补偿点 (Light compensation point, LCP) 以及表观光量子效率 (apparent quantum yield, AQY); 光能利用效率 (light use efficiency, LUE) 和水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 参照刘玉静等^[9]的方法计算; 叶片碳利用效率 (carbon use efficiency, CUE) 参照 Frantz 和 Bugbee^[10]的方法计算。

1.3.2 光合氮利用效率测定 每种植物光合氮利用效率 (photosynthetic nitrogen-use efficiency, PNUE) 参照刘玉静等^[9]和苗艳明等^[11]的方法计算。

1.3.3 矿质元素利用效率测定 灰分含量利用马福炉干灰化法测定。矿质元素利用效率 (use efficiency of mineral elements, MUE) 参照刘玉静等^[9]方法计算。

1.4 资源利用效率综合指数的计算

资源利用效率综合指数 (comprehensive indices of resource use efficiency, CIR) 参照雷雨婷等^[12]的方法计算。

$$CIR = \frac{1}{n} \sum RI_i \quad (1)$$

式 (1) 中 $RI_i = \frac{x_i - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}$ 。 x_i 为各实际测定

值, x_{max} 和 x_{min} 为该指标的最大和最小值。

1.5 数据分析与统计方法

本试验结果以“平均值±标准差”计, 利用 Origin7.5 作图、SPSS17.0 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 4 种草本植物光合特性的比较

4 种草本植物的净光合速率-光照强度响应曲线如图 1。4 种植物的净光合速率随光照强度的变化存在明显差异, 狗牙根的净光合速率最高, 砂引草最低, 筛草和肾叶打碗花居中。4 种植物的光合作用相关指标列于表 1, 经差异显著性分析显示, 光合性能各项指标在 4 个物种之间均差异显著 ($P < 0.05$)。其中, 砂引草的表观光量子效率、最大净光合速率、光饱和点和光补偿点均显著低于其他 3 种 ($P < 0.05$); 表观光量子效率和最大净光合速率狗牙根最高, 筛草和肾叶打碗花次之且两者之间差异较小; 光饱和点和光补偿点则是筛草和肾叶打碗花较高且两者之间差异不显著 ($P > 0.05$)、狗牙根次之。

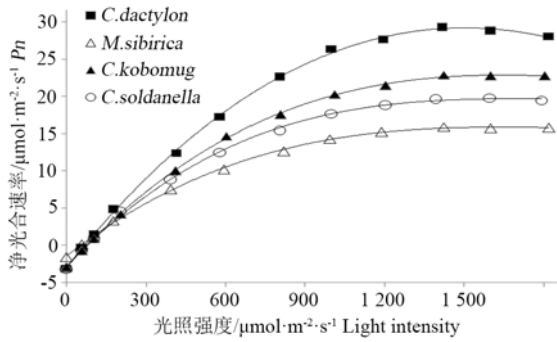


图 1 4 种草本植物净光合速率(P_n)-光照强度响应曲线
Figure 1 The light response curves of the net photosynthetic rates in four herbaceous species

2.2 4 种草本植物对环境资源利用效率的比较

对 4 种草本植物光能利用效率和水分利用效率

的比较结果(表 2)显示, 2 种单子叶草本植物狗牙根和筛草不仅具有高的光能利用效率, 其水分利用效率也显著高于双子叶草本植物砂引草和肾叶打碗花, 砂引草的光能利用效率和水分利用效率均为最低。4 种草本植物的碳、氮利用效率也存在一定差别(表 2), 差异显著性分析显示砂引草的叶片碳利用效率和光合氮利用效率显著高于肾叶打碗花 ($P < 0.05$), 狗牙根的这两项指标则显著高于其他三者 ($P < 0.05$), 且狗牙根的光合氮利用效率约为其他三者的 3.2~4.5 倍。4 种草本植物的矿质元素利用效率则表现为 2 个双子叶草本植物砂引草和肾叶打碗花明显高于 2 个单子叶草本植物筛草和狗牙根 ($P < 0.05$), 前者约为后者的 1.5~2 倍(表 2)。

表 1 4 种草本植物光合作用相关指标的比较

Table 1 Comparison of the photosynthetic parameters in 4 species

物种 Species	表观光量子效率 /mmol·mol ⁻¹ AQY	最大净光合速率 /μmol·m ⁻² ·s ⁻¹ P_{max}	光饱和点 /μmol·m ⁻² ·s ⁻¹ LSP	光补偿点 /μmol·m ⁻² ·s ⁻¹ LCP
砂引草 <i>M. sibirica</i>	27.46±1.18 ^c	16.10±0.56 ^d	1 330.09±135.17 ^c	53.49±2.88 ^c
筛草 <i>C. kobomug</i>	34.08±1.69 ^b	22.22±0.59 ^b	1 561.88±125.08 ^a	79.36±5.78 ^a
肾叶打碗花 <i>C. soldanella</i>	36.02±2.29 ^b	20.10±0.84 ^c	1 546.92±143.89 ^a	81.38±7.22 ^a
狗牙根 <i>C. dactylon</i>	45.22±0.75 ^a	29.40±2.01 ^a	1 416.15±31.25 ^b	69.35±9.21 ^b

注: 相同字母表示不同植物该项指标差异不显著, 不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: The same letter indicates that there is no significant difference in this index between different plants. Different letters indicate a significant difference at the 0.05 level. The same below.

表 2 4 种草本植物对环境资源的利用效率

Table 2 The resource use efficiency of 4 species

物种 Species	光能利用效率 /mmol·mol ⁻¹ LUE	水分利用效率 /mmol·mol ⁻¹ WUE	光合氮利用效率 /μmol·mol ⁻¹ ·s ⁻¹ PNUE	碳利用效率 /mol·mol ⁻¹ CUE	矿质元素利用效率 /mg·g ⁻¹ (DW) UMUE
砂引草 <i>M. sibirica</i>	10.84±0.87 ^d	2.78±0.22 ^c	343.89±12.08 ^b	0.83±0.01 ^b	173.53±5.85 ^a
筛草 <i>C. kobomug</i>	16.03±0.83 ^b	4.98±0.16 ^a	297.20±7.90 ^{bc}	0.82±0.01 ^{bc}	88.56±3.44 ^c
肾叶打碗花 <i>C. soldanella</i>	14.57±0.84 ^c	3.66±0.50 ^b	243.43±10.17 ^c	0.80±0.00 ^c	132.82±4.68 ^b
狗牙根 <i>C. dactylon</i>	25.30±2.17 ^a	4.85±0.17 ^a	1 098.30±75.18 ^a	0.86±0.01 ^a	77.89±3.25 ^d

表 3 4 种草本植物的 RI_i 和 CIR 值

Table 3 The RI_i and the comprehensive indices of resource use efficiency (CIR) of 4 species

指标 Parameter	砂引草 <i>M. sibirica</i>	筛草 <i>C. kobomug</i>	肾叶打碗花 <i>C. soldanella</i>	狗牙根 <i>C. dactylon</i>
光能利用率 LUE	0.000	0.359	0.253	1.000
水分利用率 WUE	0.000	1.000	0.400	0.941
光合氮利用率 PNUE	0.032	0.048	0.000	1.000
碳素利用率 CUE	0.500	0.333	0.000	1.000
矿质元素利用率 MUE	1.000	0.112	0.574	0.000
最大净光合速率 P_{max}	0.000	0.560	0.429	1.000
光饱和点 LSP	0.000	1.000	0.935	0.371
综合指数 CIR	0.219	0.487	0.370	0.759
排序 Rank	4	2	3	1

2.3 4 种草本植物资源利用效率的综合分析

为了全面、准确评价 4 种草本植物对环境资源的利用状况,本试验采用隶属函数法对 LUE、WUE、PNUE 和 MUE 等资源利用效率以及体现光合性能的 2 个重要参数 P_{\max} 和 LSP 等进行综合分析并排序,狗牙根具有最高的环境资源利用效率,其他 3 种草本植物的排序从高到低为:筛草、肾叶打碗花和砂引草(表 3)。

3 讨论与结论

植物的资源利用效率涵盖植物对所处环境的光能、水分和营养元素等的吸收、转化和利用状况。光是影响植物生长发育最重要的生态因子之一,较高的叶片光合速率是植物较高的干物质积累和旺盛生长的前提,植物光能利用效率大小决定着植物生产力的高低^[13-14],水分利用效率则体现了光合作用和水分代谢的耦合关系,高的水分利用率也是表征植物具有较高抗旱性的指示^[16-18]。本试验结果显示,4 种草本植物中,最大净光合速率和表观光量子效率以狗牙根为最高,砂引草最低,筛草和肾叶打碗花居两者之间;光饱和点和光补偿点在 4 种植物间虽存在明显差异 ($P < 0.05$),但都比较高,说明 4 种草本植物均适宜在强光照的条件下生长。同时,2 种单子叶草本植物狗牙根和筛草的光能利用率和水分利用率均显著高于 2 种双子叶草本植物肾叶打碗花和砂引草,说明在海岸近海前沿狗牙根和筛草不仅具有更高的生长潜力而且具有更好的耐旱能力。

碳利用效率被定义为植物积累总生物量的碳与其光合同化碳素总量的比值或净光合速率与总光合速率的比率^[19-20],高的碳利用效率说明植物能够将光同化的碳素更多地分配到生长和贮存器官,有利于其生长和繁殖^[21]。光合氮利用效率是评价植物光合作用过程中氮素投入效率以及植物氮素利用效率与固定、同化二氧化碳关系的指标,用来衡量植物氮素代谢的综合能力^[15,22],高的光合氮利用效率常常表征植物具有高的生长速率^[23]。关于矿质元素利用效率,Villar 等^[24]认为植物矿质元素的吸收和积累不需要直接的能量供给,矿质元素含量(灰分含量)的增加能够减少植物建造自身的物质和能量消耗,从而有利于增强植物的扩张力;郭水良等^[25]也认为叶片灰分含量高代表植物的代谢较为旺盛、生长较为迅速。本试验结果显示,4 种草本植物的碳利用效率和光合氮利用效率均表现为狗牙根最高,砂引草次之,筛草第 3,肾叶打碗花最低,且

狗牙根显著高于其他 3 种;而矿质元素利用效率则是两种双子叶草本植物砂引草和肾叶打碗花远高于两种单子叶草本植物筛草和狗牙根,其中砂引草最高,狗牙根最低。可见,狗牙根能够更节约地利用氮素,而砂引草则能更充分地吸收利用矿质元素。

山东半岛沙质海岸前沿 4 种草本植物狗牙根、筛草、肾叶打碗花和砂引草均适宜在较强光照条件下生长,且狗牙根的光合能力最强,狗牙根和筛草有较高的光能利用效率和水分利用效率,狗牙根还有较高的叶片碳利用效率和光合氮利用效率,砂引草和肾叶打碗花则具有较高的矿质元素利用效率。综合分析可以发现,4 种草本植物的资源利用效率综合指数以狗牙根为最高,筛草次之,肾叶打碗花第 3,砂引草最低。也就是说,在山东半岛沙质海岸前沿环境条件下,狗牙根具有最强的生长和扩张潜力,筛草也较高,而肾叶打碗花和砂引草则相对较弱。当然,在沙质海岸前沿草带的恢复、重建的物种选择时还应了解其耐沙埋能力以及遵循物种多样性的原则。

参考文献:

- [1] NAGEL J M, GRIFFIN K L. Construction cost and invasive potential: comparing *Lythrum salicaria* (Lythraceae) with co-occurring native species along pond banks [J]. *Am J Bot*, 2001, 88(12): 2252-2258.
- [2] CHEN S P, BAI Y F, ZHANG L X, et al. Comparing physiological responses of two dominant grass species to nitrogen addition in Xilin River Basin of China [J]. *Environ Exp Bot*, 2005, 53(1): 65-75.
- [3] FUNK J L, VITOUSEK P M. Resource-use efficiency and plant invasion in low-resource systems [J]. *Nature*, 2007, 446(7139): 1079-1081.
- [4] 张敦论, 乔勇进, 郝金标, 等. 胶南市沙质海岸灌草带植物群落分布及特性的研究 [J]. *山东林业科技*, 2000,30(3): 1-4.
- [5] 韩广轩, 王光美, 张志东, 等. 烟台海岸黑松防护林种群结构及其随离岸距离的变化 [J]. *林业科学*, 2008, 44(10): 8-13.
- [6] 董周焱, 柏新富, 侯玉平, 等. 胶东滨海 8 种树木叶片热值、建成成本及其适应能力 [J]. *林业科学*, 2015, 51(3): 8-15.
- [7] 周瑞莲, 赵彦宏, 杨润亚, 等. 海滨滨麦叶片和根对不同厚度沙埋的生理响应差异分析 [J]. *生态学报*, 2015, 35(21): 7080-7088.
- [8] YE Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. *Photosynthetica*, 2007, 45 (4): 637-640.
- [9] 刘玉静, 董周焱, 柏新富, 等. 烟台海岸防护林带 6 树种资源利用效率比较 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(4): 570-575.
- [10] FRANTZ J M, BUGBEE B. Acclimation of plant popula-

- tions to shade: photosynthesis, respiration, and carbon use efficiency [J]. *J Am Soc Hort Sci*, 2005, 130(6): 918-927.
- [11] 苗艳明, 吕金枝, 毕润成, 等. 翅果油树叶性特征的动态变化[J]. *植物学报*, 2012, 47(3): 257-263.
- [12] 雷雨婷, 吕立堂, 赵德刚. 应用隶属函数法筛选贵州玉米苗期抗寒种质[J]. *山地农业生物学报*, 2017, 36(2): 35-39.
- [13] GOERNER A, REICHSTEIN M, RAMBAL S. Tracking seasonal drought effects on ecosystem light use efficiency with satellite-based PRI in a Mediterranean forest [J]. *Remote Sens Environ*, 2009, 113(5): 1101-1111.
- [14] PEÑUELAS J, FILELLA I, LLUSIA J, et al. Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the Mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia* [J]. *J Exp Bot*, 1998, 49(319): 229-238.
- [15] 张永娥, 余新晓, 陈丽华, 等. 北京西山侧柏林冠层不同高度处叶片水分利用效率[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2143-2148.
- [16] 曹生奎, 冯起, 司建华, 等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3882-3892.
- [17] 沈芳芳, 樊后保, 吴建平, 等. 植物叶片水平 $\delta^{13}\text{C}$ 与水分利用效率的研究进展[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(11): 114-124.
- [18] 梅旭荣, 钟秀丽, 刘晓英. 探讨品种间差异改良作物水分利用效率[J]. *作物学报*, 2013, 39(5): 761-766.
- [19] CURTIS P S, VOGEL C S, GOUGH C M, et al. Respiratory carbon losses and the carbon-use efficiency of a northern hardwood forest, 1999-2003 [J]. *New Phytol*, 2005, 167(2): 437-456.
- [20] VAN IERSEL M W. Carbon use efficiency depends on growth respiration, maintenance respiration, and relative growth rate. A case study with lettuce [J]. *Plant Cell Environ*, 2003, 26(9): 1441-1449.
- [21] BRADFORD M A, CROWTHER T W. Carbon use efficiency and storage in terrestrial ecosystems [J]. *New Phytol*, 2013, 199(1): 7-9.
- [22] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. *Nature*, 2004, 428(6985): 821-827.
- [23] HIKOSAKA K. Interspecific difference in the photosynthesis-nitrogen relationship: patterns, physiological causes, and ecological importance [J]. *J Plant Res*, 2004, 117(6): 481-494.
- [24] VILLAR R, MERINO J. Comparison of leaf construction costs in woody species with differing leaf life-spans in contrasting ecosystems [J]. *New Phytol*, 2001, 151(1): 213-226.
- [25] 郭水良, 黄华, 晁柯, 等. 金华市郊 10 种杂草的热值和灰分含量及其适应意义[J]. *植物研究*, 2005, 25(4): 460-464.