

# 入侵植物小飞蓬及其伴生植物的光合特性 \*

王晓红<sup>1,2</sup> 纪明山<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> 沈阳农业大学植物保护学院, 沈阳 110161; <sup>2</sup> 沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110161)

**摘要** 为探讨小飞蓬的入侵机制和制定有效的治理措施, 对入侵植物小飞蓬及其主要伴生植物山苦荬和鸭跖草的光合特性进行研究。结果表明: 小飞蓬的光饱和点和光补偿点分别为 1634.00 和 23.84  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 介于 2 种伴生植物之间; 光饱和点下的最大净光合速率为 28.12  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 显著高于 2 种伴生植物; 表观量子效率为 0.06, 与山苦荬差异不显著, 但显著高于鸭跖草。小飞蓬的  $\text{CO}_2$  饱和点和  $\text{CO}_2$  补偿点分别为 834.00 和 23.69  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $\text{CO}_2$  饱和点下的最大净光合速率为 31.97  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 介于 2 种伴生植物之间; 羧化效率为 0.078, 显著高于伴生植物。有效光合辐射和  $\text{CO}_2$  浓度的变化对小飞蓬及其伴生植物的气孔导度、蒸腾速率影响不显著, 但显著影响其水分利用率。小飞蓬具有较高的光合速率和物质积累能力, 较高的生产力是其成功入侵的重要因素之一。

**关键词** 生物入侵 生物多样性 小飞蓬 伴生植物 光合参数

**文章编号** 1001-9332(2013)01-0071-07 **中图分类号** Q142, Q945.79 **文献标识码** A

**Photosynthetic characteristics of an invasive plant *Conyza canadensis* and its associated plants.** WANG Xiao-hong<sup>1,2</sup>, JI Ming-shan<sup>1</sup> (<sup>1</sup>College of Plant Protection, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; <sup>2</sup>College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(1): 71–77.

**Abstract:** To explore the invasion mechanisms of *Conyza canadensis* and develop effective control measures, this paper studied the photosynthetic characteristics of the invasive plant and its main associated plants *Ixeris chinensis* and *Commelina communis*. The light saturation point and light compensation point of *C. canadensis* were 1634.00 and 23.84  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively, which were between those of the two associated plants. The maximum net photosynthetic rate of *C. canadensis* below light saturation point was 28.12  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , being much higher than that of the two associated plants. The apparent quantum yield of *C. canadensis* was 0.06, equal to that of *I. chinensis* but higher than that of *C. communis*. The  $\text{CO}_2$  saturation point and  $\text{CO}_2$  compensation point of *C. canadensis* were 834.00 and 23.69  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , respectively. The maximum net photosynthetic rate of *C. canadensis* below  $\text{CO}_2$  saturation point was 31.97  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , which was between that of the two associated species. The carboxylation efficiency of *C. canadensis* was 0.078, being higher than that of the two associated species. The variations of photosynthetically active radiation and  $\text{CO}_2$  concentration had little effects on the stomatal conductance and transpiration rate of the three plants, but significantly affected their water use efficiency. *C. canadensis* had higher photosynthetic rate and material accumulation capability, and its high productivity could be one of the important factors for its successful invasion.

**Key words:** bio-invasion; biodiversity; *Conyza canadensis*; associated plant; photosynthetic parameter.

入侵植物给世界各国带来了巨大的经济和生态破坏, 已成为生物多样性保育和生态系统恢复研究

的热点问题<sup>[1-2]</sup>。目前, 我国查明的入侵植物已超过 380 种<sup>[3]</sup>, 其中, 紫茎泽兰 (*Eupatorium coelestium*)<sup>[4]</sup>、薇甘菊 (*Mikania micrantha*)<sup>[5]</sup>、水葫芦 (*Eichhornia crassipes*)<sup>[6]</sup> 和互花米草 (*Spartina alterniflora*)<sup>[7]</sup> 等备受关注。

\* 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(2009R49)资助。

\* \* 通讯作者. E-mail: jimingshan@163.com

2012-06-27 收稿, 2012-11-09 接受。

小飞蓬 (*Conyza canadensis*) 为菊科白酒草属越年生或一年生植物, 原产于北美洲, 1860 年在我国山东烟台被发现, 随后 7 年内相继在南方各省出现, 现几乎遍布全国<sup>[8]</sup>. 近年来, 小飞蓬在很多地区发生面积快速增长, 在农田、路边、山坡和草坪等生境形成单优势种群, 如不及时治理, 可能造成较大危害<sup>[9-10]</sup>.

近年来, 对小飞蓬入侵机制的研究多集中在生物学特性<sup>[11-12]</sup> 和化感作用<sup>[13]</sup> 等方面. 有关小飞蓬入侵的生态机制, 尤其是光合生理生态特性涉及较少. 有研究表明, 小飞蓬在自然光照条件下净光合速率高于其伴生植物, 并且具有“午休”现象<sup>[14]</sup>. 但是, 关于影响光合作用的主要生态因子——光照和 CO<sub>2</sub> 的变化对小飞蓬光合速率的影响尚未有详细报道<sup>[15-17]</sup>. 为此, 本文以小飞蓬及其伴生植物山苦荬 (*Ixeris chinensis*) 和鸭跖草 (*Commelinaceae communis*) 为研究对象, 进行光合-光强响应和光合-CO<sub>2</sub> 响应测定, 并通过模型拟合得出饱和点和补偿点等光合生理参数, 探讨小飞蓬对环境光强变化和 CO<sub>2</sub> 浓度的响应机制, 为完善小飞蓬的入侵机制和制定有效治理措施提供科学依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省沈阳市沈阳农业大学百草园 (41°46' N, 123°25' E). 该区海拔 50 m, 气候属北温带大陆性季风气候, 四季分明, 雨热同季, 冬季较长, 年均温 8.1 °C, ≥10 °C 有效积温 3570.6 °C, 无霜期 150 ~ 170 d, 最冷月平均气温 -16.5 °C, 最热月平均气温 25.3 °C, 年降水量 721.9 mm, 集中于 7—8 月, 年蒸发量 1600 mm.

### 1.2 试验设计

试验于 2011 年 6 月在百草园内草坪种植区进行. 草坪种植品种为草地早熟禾 (*Poa pratensis*), 优势杂草为小飞蓬, 伴生杂草有山苦荬、鸭跖草、藜 (*Chenopodium album*) 等. 随机设置 1 m × 1 m 样方 5 个. 选择全天晴朗无云的天气, 于 9:00—11:00 选取样方中小飞蓬、山苦荬和鸭跖草 3 种植物处于营养生长期的植株 1 株. 采用 LI-6400 便携式光合测定仪 (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA) 对 3 种植物样株的净光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ )、气孔导度 ( $g_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 ( $C_i$ ) 等指标进行测定<sup>[18]</sup>. 每种植物测定 1 株, 选取由上至下第 2、3 片叶进行测定, 每片叶测 3 次, 测定时保持叶片自然生长角度不变.

小飞蓬、山苦荬和鸭跖草的平均株高分别为 (90.5 ± 5.5)、(40.5 ± 5.5) 和 (50.5 ± 5.5) cm.

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 光合-光强响应测定** 在预试验的基础上, 利用 LI-6400 便携式光合测定仪, 以小钢瓶内液态 CO<sub>2</sub> 为气源, 设置成自然 CO<sub>2</sub> 浓度条件 (390 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup>), 通过内部温度调节器控制叶室温度为 25 °C, 空气相对湿度为 70%. 红蓝光源设置叶室有效光合辐射梯度为 2000、1800、1500、1200、1000、800、600、400、200、100、80、50 和 0 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 利用自动测量程序进行光合-光强 ( $P_n$ -PAR) 响应的测定<sup>[19]</sup>.

**1.3.2 光合-CO<sub>2</sub> 响应测定** 利用 LI-6400 便携式光合测定仪的红蓝光源设定叶室中光合有效辐射强度为 1700 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 此辐射强度处于一般阳性植物的光饱和点范围 (1500 ~ 2000 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)<sup>[18]</sup>. 利用 LI-6400 便携式光合测定仪内部温度调节器控制叶室温度为 25 °C, 空气相对湿度为 70%. 以小钢瓶内液态 CO<sub>2</sub> 为气源, 设置 CO<sub>2</sub> 浓度梯度为 1200、1000、800、500、300、150、100、50 和 0 μmol · mol<sup>-1</sup>, 利用自动测量程序进行光合-CO<sub>2</sub> ( $P_n$ -C<sub>i</sub>) 响应的测定<sup>[19]</sup>.

### 1.4 数据处理

光合-光强响应曲线采用 Farquhar 等提出的经典生化模型<sup>[20]</sup> 和线性方程进行拟合, 模型方程为:

$$P_n = \{ \alpha I + P_{n\max} - \text{SQRT} [(\alpha I + P_{n\max})^2 - 4K\alpha I P_{n\max}] \} / 2K - R_{day}$$

式中:  $P_n$  为净光合速率 (μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>);  $\alpha$  为表观量子效率 (AQY);  $P_{n\max}$  为最大净光合速率;  $I$  为光合有效辐射 (PAR);  $K$  为光响应曲线的曲角;  $R_{day}$  为暗呼吸速率. 将光强为 200 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 以下的  $P_n$ -PAR 响应曲线进行直线回归, 其斜率为表观量子效率. 该方程与最大净光合速率的交点为光饱和点 (LSP), 与  $x$  轴的交点为光补偿点 (LCP).

光合-CO<sub>2</sub> 响应曲线拟合采用直角双曲线模式<sup>[21]</sup>, 其方程为:

$$P_n = CE \cdot C_i \cdot P_{n\max} / (CE \cdot C_i + P_{n\max}) - R_p$$

式中:  $CE$  为植物 RuBP 羧化效率;  $C_i$  为胞间 CO<sub>2</sub> 浓度;  $P_{n\max}$  为一定光强下 CO<sub>2</sub> 达到饱和点时的最大表观光合速率;  $R_p$  为植物的光呼吸速率. 将 CO<sub>2</sub> 浓度为 200 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 以下的  $P_n$ -C<sub>i</sub> 响应曲线进行直线回归, 其斜率为羧化效率.

水分利用率 (water use efficiency, WUE)<sup>[22]</sup> 的

计算公式为:

$$WUE = P_n / T_r$$

式中:  $T_r$  为蒸腾速率 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

采用 SPSS 16.0 和 Excel 2007 软件进行数据统计分析和作图,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD 法)进行方差分析和差异显著性比较( $\alpha=0.05$ ). 图表中数据为平均值±标准差.

## 2 结果与分析

### 2.1 植物光合作用对有效光合辐射的响应

**2.1.1 光合-光响应曲线的特征** 光合-光响应曲线反映了植物光合速率随光照强度变化的规律<sup>[22]</sup>. 由图 1 可以看出,随着有效光合辐射的增强,小飞蓬及其伴生植物的净光合速率均呈先增加后降低的趋势,其中,小飞蓬的增加幅度最大. 当达到一定的光合辐射强度时,净光合速率达到最大值,即为光饱和

点. 小飞蓬( $R^2=0.99$ )、山苦荬( $R^2=0.96$ )、鸭跖草( $R^2=0.94$ )的净光合速率与有效光合辐射的相关性均达显著水平,由 Farquhar 生化模型及直线回归方程可以计算出 3 种植物的光合响应参数(表 1).

由表 1 可以看出,3 种植物的光饱和点均高于  $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其大小顺序为鸭跖草>小飞蓬>山苦荬,小飞蓬与 2 种伴生植物的光饱和点差异均达到显著水平;光补偿点的大小顺序为山苦荬>小飞蓬>鸭跖草,其中,小飞蓬的光补偿点为  $23.84 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,介于 2 种伴生植物之间,且差异达到显著水平;小飞蓬与山苦荬的表观量子效率无显著差异,且均显著大于鸭跖草;3 种植物的最大净光合速率大小顺序为小飞蓬>山苦荬>鸭跖草,其中,小飞蓬的最大净光合速率为  $28.12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,显著大于 2 种伴生植物,说明与 2 种伴生植物相比,小飞蓬对光能的利用率最高,在相同的有效光合辐射下,其积累干物质的能力最强.

表 1 小飞蓬及其伴生植物的光合响应特征参数

Table 1 Photosynthetic parameters of *Conyza canadensis* and its associated plants

物种 Species	光饱和点 LSP ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	光补偿点 LCP ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	表观量子效率 AQY	最大净光合速率 $P_{n \max}$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
小飞蓬 <i>Conyza canadensis</i>	$1634.00 \pm 4.18$ b	$23.84 \pm 1.18$ b	$0.058 \pm 0.005$ a	$28.12 \pm 0.37$ a
山苦荬 <i>Ixeris chinensis</i>	$1556.43 \pm 6.92$ c	$32.58 \pm 0.63$ a	$0.058 \pm 0.002$ a	$21.10 \pm 1.03$ b
鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	$1730.00 \pm 6.85$ a	$20.22 \pm 0.56$ c	$0.053 \pm 0.001$ b	$18.77 \pm 0.39$ c

同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

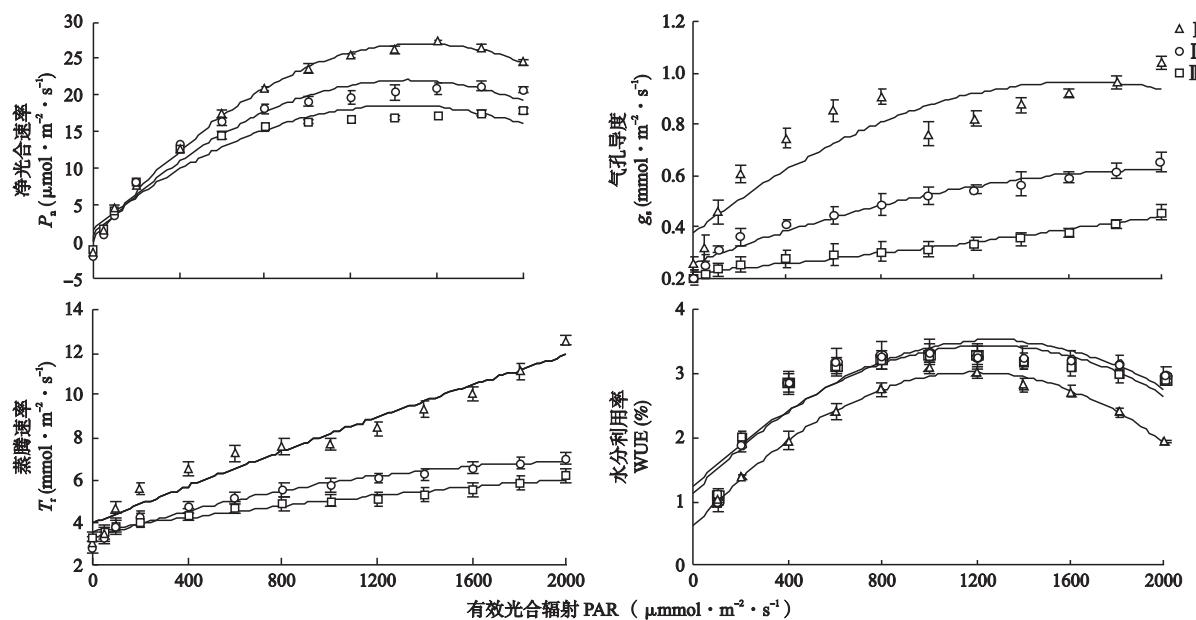


图 1 小飞蓬及其伴生植物光合-光响应曲线

Fig. 1  $P_n$ -PAR curve of *Conyza canadensis* and its associated plants.

I : 小飞蓬 *Conyza canadensis*; II : 山苦荬 *Ixeris chinensis*; III : 鸭跖草 *Commelina communis*. 下同 The same below.

**2.1.2 气孔导度的变化** 植物光合作用所需的 CO<sub>2</sub> 主要通过气孔吸收。由图 1 可以看出, 随着有效光合辐射的增强, 小飞蓬及其伴生植物的气孔导度均呈不同程度的上升趋势, 其中, 小飞蓬气孔导度的上升幅度明显高于 2 种伴生植物。气孔不但是 CO<sub>2</sub> 进出的门户, 也是 O<sub>2</sub> 和水蒸汽的扩散通道, 因此植物的气孔开闭不但与光合作用有关, 还与呼吸作用和蒸腾作用有密切关系。与 2 种伴生植物相比, 小飞蓬的气孔导度受外界有效光合辐射的影响较大, 对水分的保持能力不如其伴生植物。

**2.1.3 蒸腾速率和水分利用率的变化** 植物的蒸腾速率主要受光照和叶外空气湿度的影响。小飞蓬及其伴生植物的叶片蒸腾速率均随有效光合辐射的增强呈逐渐上升趋势(图 1), 其中, 小飞蓬的叶片蒸腾速率上升速度最快, 蒸腾速率的上升幅度明显高于山苦荬和鸭跖草, 说明与 2 种伴生植物相比, 小飞蓬的水分散失较快。

小飞蓬及其伴生植物的叶片水分利用率随有效光合辐射的增强呈先上升后下降的趋势, 当有效光

合辐射为 1200 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 时, 3 种植物的水分利用率达到最大值(图 1)。山苦荬和鸭跖草的水分利用率显著高于小飞蓬, 说明 2 种伴生植物的抗旱能力强于小飞蓬。

## 2.2 植物光合作用对 CO<sub>2</sub> 浓度的响应

**2.2.1 光合-CO<sub>2</sub> 响应曲线的特征** 光合-CO<sub>2</sub> 响应曲线反映了植物光合速率随 CO<sub>2</sub> 浓度变化的规律<sup>[21]</sup>。由图 2 可以看出, 小飞蓬及其伴生植物的净光合速率均随 CO<sub>2</sub> 浓度的增加呈先增大后减小的趋势, 当 CO<sub>2</sub> 浓度为 900 μmol · mol<sup>-1</sup> 时, 3 种植物的净光合速率达到最大值。小飞蓬 ( $R^2 = 0.98$ )、山苦荬 ( $R^2 = 0.99$ )、鸭跖草 ( $R^2 = 0.99$ ) 的净光合速率与 CO<sub>2</sub> 浓度的相关性均达显著水平, 由直角双曲线模型和直线回归方程可以计算出 3 种植物的 CO<sub>2</sub> 响应参数(表 2)。

由表 2 可以看出, 3 种植物的 CO<sub>2</sub> 浓度响应参数值的差异均达到显著水平, 其中, CO<sub>2</sub> 饱和点的大小顺序为山苦荬>小飞蓬>鸭跖草, CO<sub>2</sub> 补偿点的大小顺序为山苦荬>鸭跖草>小飞蓬, 最大净光合速率

表 2 小飞蓬及其伴生植物的 CO<sub>2</sub> 响应参数

Table 2 CO<sub>2</sub> response parameters of *Conyza canadensis* and its associated plants

物种 Species	CO <sub>2</sub> 饱和点 CSP (μmol · mol <sup>-1</sup> )		CO <sub>2</sub> 补偿点 CCP (μmol · mol <sup>-1</sup> )		最大净光合速率 $P_{n\max}$ (μmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	羧化效率 CE
小飞蓬 <i>Conyza canadensis</i>	834.00±11.97b		23.69±1.74c		31.97±0.95b	0.078±0.004a
山苦荬 <i>Ixeris chinensis</i>	897.20±6.65a		41.58±4.41a		34.91±0.74a	0.056±0.001b
鸭跖草 <i>Commelinia communis</i>	804.60±3.58c		29.76±1.85b		28.60±0.69c	0.052±0.005c

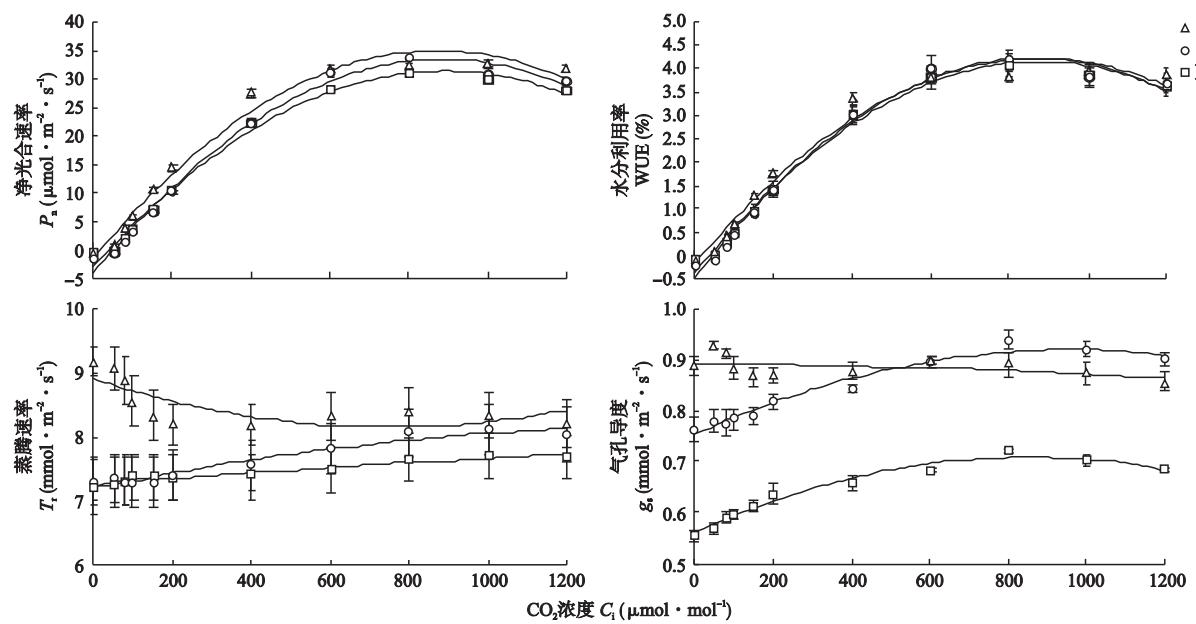


图 2 小飞蓬及其伴生植物的光合-CO<sub>2</sub> 响应曲线

Fig. 2  $P_n$ - $C_i$  curve of *Conyza canadensis* and its associated plants.

的大小顺序为山苦荬>小飞蓬>鸭跖草, 羧化效率的大小顺序为小飞蓬>山苦荬>鸭跖草。

**2.2.2 气孔导度的变化** 由图2可以看出, 小飞蓬及其伴生植物的气孔导度随CO<sub>2</sub>浓度的升高变化较平稳。其中, 小飞蓬的气孔导度随CO<sub>2</sub>浓度的升高呈逐渐降低趋势; 山苦荬和鸭跖草的气孔导度随CO<sub>2</sub>浓度的升高呈先增大后减小的趋势, 当CO<sub>2</sub>浓度为800 μmol·mol<sup>-1</sup>时, 达到最大值。小飞蓬的气孔导度与山苦荬差异不显著, 但显著高于鸭跖草。

**2.2.3 蒸腾速率和水分利用率的变化** 由图2可以看出, 随着CO<sub>2</sub>浓度的升高, 山苦荬和鸭跖草的蒸腾速率呈逐渐上升趋势, 但整体变化较平稳; 当CO<sub>2</sub>浓度为0~800 μmol·mol<sup>-1</sup>时, 小飞蓬的蒸腾速率呈下降趋势, 当CO<sub>2</sub>浓度>800 μmol·mol<sup>-1</sup>时, 小飞蓬的蒸腾速率逐渐增大, 略高于山苦荬和鸭跖草, 但差异不显著。

小飞蓬及其伴生植物的水分利用率随着CO<sub>2</sub>浓度的升高均呈先增大后减小的趋势, CO<sub>2</sub>浓度为800 μmol·mol<sup>-1</sup>时达到最大值。小飞蓬的水分利用率与山苦荬和鸭跖草差异不显著。

### 3 讨 论

光是植物生长必需的生态因子之一, 植物对光的吸收能力和光合作用过程的适应能力在很大程度上体现了植物生长与竞争的能力<sup>[23]</sup>。对入侵植物而言, 成功入侵的因素是多方面的, 而其自身的生理特性对于其种群入侵、生存和扩展至关重要, 有些外来物种具有比本地种更强的光能利用率和光合响应机制, 从而使它们具有很强的入侵潜力<sup>[24]</sup>。

一般阳性植物的光饱和点为1500~2000 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 光补偿点为50~100 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 阴性植物的光饱和点较阳性植物低, 光补偿点<20 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup><sup>[25]</sup>。本研究中, 小飞蓬的光饱和点>1500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 属于喜阳植物。通过Farquhar生化模型拟合得出, 与2种伴生植物相比, 小飞蓬的光饱和点较高, 而光补偿点较低, 说明小飞蓬具有较宽的有效光合辐射范围, 这是其入侵成功的主要原因之一。这与对薇甘菊(*Mikania micrantha*)<sup>[5]</sup>、南美蟛蜞菊(*Wedelia trilobata*)<sup>[18]</sup>、加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)<sup>[15]</sup>和紫茎泽兰(*Eupatorium coelestinum*)<sup>[26]</sup>等入侵植物光合特性的研究结果一致。

光量子利用效率(AQY)反映了植物利用弱光进行光合作用的能力, 最大净光合速率可反映植物

对光合有效辐射的利用和适应能力。光合作用与植物生境关系密切, 而植物生长速度的快慢是其在群落中占领空间取得优势的重要条件。因此, 光响应曲线的参数, 如最大净光合速率、光饱和点、光补偿点和表观量子效率等, 已成为植物速生丰产的科学依据<sup>[27]</sup>。本研究中, 小飞蓬的净光合速率明显高于2种伴生植物, 而表观量子效率也显著高于鸭跖草, 且与山苦荬差异不显著。说明小飞蓬具有更强的弱光光能利用能力, 而且在相同光强条件下, 小飞蓬积累物质的能力明显高于其伴生植物, 生长迅速。这与高侃等<sup>[14]</sup>对小飞蓬在自然光条件下的光合特性研究结果一致。另外, 有研究表明, 小飞蓬在营养生长期的茎、叶生物量占地上总生物量的97%<sup>[13]</sup>。可见, 小飞蓬能够通过较高的光合速率, 迅速积累有机物质, 以快速生长方式获得竞争优势, 使其在不同生境条件下形成单优势种群。

CO<sub>2</sub>是植物光合作用的基本原料。植物对CO<sub>2</sub>浓度的适应范围不但影响其分布, 更影响光合效率。羧化效率(CE)反映了植物在较低CO<sub>2</sub>浓度条件下对CO<sub>2</sub>的利用能力。有研究提出, 羧化效率的差别是植物之间光合效率差异的主要原因<sup>[28]</sup>。本研究中, 小飞蓬具有较高的CO<sub>2</sub>饱和点和较低的CO<sub>2</sub>补偿点, 显示了具有比伴生植物更宽的CO<sub>2</sub>浓度适应范围。在相同的CO<sub>2</sub>浓度条件下, 小飞蓬的光合速率也较高, 而且其羧化效率达0.078, 显著高于伴生植物, 说明小飞蓬具有较强的CO<sub>2</sub>利用能力。这也有助于从光合特性方面解释小飞蓬生长迅速、生产力高的入侵特性。

许多外来植物成功入侵并形成优势种群, 往往要通过适应性机制、进化机制等多种机制综合作用, 才能建立种群和扩散空间。有研究表明, 在我国74个地区282种入侵植物的分布中, 小飞蓬的出现频率最高, 为0.86; 小飞蓬的生态位重要值在各地区均占调查植物的前10位, 表明其生态位相对较宽<sup>[29]</sup>, 对环境的适应性强, 具有强大的资源竞争能力。另外, 田间调查发现, 与小飞蓬相伴而生的植物, 如山苦荬、荠菜(*Capsella bursapastoris*)等多为低矮、分枝多且叶片平铺展开的植物。在对光的竞争方面, 小飞蓬与其伴生植物之间产生了生态位分化。这些都可以认为是小飞蓬成功入侵的生物学特性。

本研究仅从光合作用方面探讨了小飞蓬的光合生理特性及其与主要伴生植物之间的差异, 要全面了解小飞蓬的入侵机制, 还需要从生物学和进化学等方面进行系统的研究。

## 参考文献

- [1] Lu Q-G (陆庆光). Harm of biological invasion. *World Agriculture* (世界农业), 1999(4): 38–39 (in Chinese)
- [2] Peng S-L (彭少麟), Xiang Y-C (向言词). The invasion of exotic plants and effects of ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1999, **19**(4): 560–569 (in Chinese)
- [3] Xie Y, Li Z, Gregg WP, et al. Invasive species in China: An overview. *Biodiversity and Conservation*, 2000, **10**: 1317–1341
- [4] Liu L-H (刘伦辉), Liu W-Y (刘文耀), Zheng Z (郑征), et al. The characteristic research of autecology ecology of Pamakani (*Eupatorium adenophorum*). *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1989, **9**(1): 66–70 (in Chinese)
- [5] Wen D-Z (温达志), Ye W-H (叶万辉), Feng H-L (冯惠玲), et al. Comparison of basic photosynthetic characteristics between exotic invader weed *Mikania micrantha* and its companion species. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2000, **8**(2): 139–146 (in Chinese)
- [6] Gao L (高雷), Li B (李博). The study of a specious invasive plant, water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): Achievements and challenges. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(6): 735–752 (in Chinese)
- [7] Deng Z-F (邓自发), An S-Q (安树青), Zhi Y-B (智颖飚), et al. Preliminary studies on invasive model and outbreak mechanism of exotic species, *Spartina alterniflora* Loisel. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(8): 2678–2686 (in Chinese)
- [8] Xu H-G (徐海根), Qiang S (强胜). Inventory Invasive Alien Species in China. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 162–163 (in Chinese)
- [9] Li Z-Y (李振宇), Xie Y (解焱). Invasive Alien Species in China. Beijing: China Forestry Press, 2002: 195 (in Chinese)
- [10] An F (安峰), Kan L-Y (阚丽艳), Xie G-S (谢贵水), et al. Alien invasion plants in Hainan Island and control countermeasures. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2007, **22**(5): 193–197 (in Chinese)
- [11] Wei DX, Xue G, Zhong JJ. A new C-10 acetylene and a new triterpenoid from *Conyza canadensis*. *Archives of Pharmacal Research*, 2007, **30**: 547–551
- [12] Pan Y-M (潘玉梅), Tang S-C (唐赛春), Pu G-Z (蒲高忠), et al. Module biomass structure of the alien invasive plant *Conyza canadensis*. *Guighiaia* (广西植物), 2009, **29**(4): 476–480 (in Chinese)
- [13] Huang H-Y (黄衡宇), Long H (龙华), Li L (李鹏), et al. Studies on Embryology of *Conyza canadensis* (L.) Cronq. *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), 2009, **27**(3): 233–241 (in Chinese)
- [14] Gao K (高侃), Han M (韩梅), Li P-J (李培建), et al. Comparison on biological and ecological characteristics of alien *Conyza canadensis* and its accompanying species. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2010, **38**(13): 6838–6840 (in Chinese)
- [15] Hu T-Y (胡天印), Fang F (方芳), Guo S-L (郭水良), et al. Comparison of basic photosynthetic characteristics between exotic invasive weed *Solidago canadensis* and its companion species. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science)* (浙江大学学报·农业与生命科学版), 2007, **33**(4): 379–386 (in Chinese)
- [16] Guo S-L (郭水良), Fang F (方芳), Huang H (黄华), et al. Studies on the reproduction and photosynthetic ecophysiology of the exotic invasive plant, *Plantago virginica*. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(6): 787–793 (in Chinese)
- [17] Guo S-L (郭水良), Fang F (方芳), Ni L-P (倪丽萍), et al. Photosynthetic characteristics and coenological survey of *Lactuca serriola* in its invaded area. *Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(12): 2316–2320 (in Chinese)
- [18] Wu Y-Q (吴彦琼), Hu Y-J (胡玉佳). Researches on photosynthetic characteristics of exotic plants *Wedelia trilobata*, *Pharbitis nil* and *Ipomoea cairica*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(10): 2334–2339 (in Chinese)
- [19] Zhu H (朱慧), Ma R-J (马瑞君). Photosynthetic characteristics comparison between an invasive plant, *Lantana camara* L. and associated species. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(5): 2701–2709 (in Chinese)
- [20] Farquhar GD, Caemmerer S. A biochemical model photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, **149**: 78–90
- [21] Ye Z-P (叶子飘). A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO<sub>2</sub>. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34**(6): 727–740 (in Chinese)
- [22] Wang M-L (王满莲), Wei X (韦霄), Jiang Y-S (蒋运生), et al. Responses of net photosynthetic rate to light intensity and CO<sub>2</sub> concentration in leaves of wild

- and cultivar *Artemisia annua*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2007, **15**(1): 45–49 (in Chinese)
- [23] Zhang J-L (张教林), Cao K-F (曹坤芳). The effect of irradiance on photosynthetic capacity, heat dissipation, and antioxidants of seedlings of two tropical rain forest tree species. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2002, **26**(6): 639–646 (in Chinese)
- [24] Pooter L. Light dependent changes in biomass allocation and their importance for growth of rainforest trees species. *Functional Ecology*, 2001, **15**: 113–123
- [25] Jiang G-M (蒋高明), Chang J (常杰), Gao Y-B (高玉葆), et al. *Plant Ecophysiology*. Beijing: Higher Education Press, 2004: 65–67 (in Chinese)
- [26] Wang J-F (王俊峰), Feng Y-L (冯玉龙), Liang H-Z (梁红柱). Adaptation of *Eupatorium adenophorum* photosynthetic characteristics to light intensity. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(8): 1373–1377 (in Chinese)
- [27] Zhao G-Q (赵广琦), Zhang L-Q (张利权), Liang X (梁霞). A comparison of photosynthetic characteristics between an invasive plant *Spartina alterniflora* and an indigenous plant *Phragmites australis*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(7): 1604–1610 (in Chinese)
- [28] Feng YL, Lei YB, Wang RF, et al. Evolutionary tradeoffs for nitrogen allocation to photosynthesis versus cell walls in an invasive plant. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**: 1835–1856
- [29] Zhang S (张帅). *Study on Invasive Biology of Alien Plant Conyza canadensis*. PhD Thesis. Shanghai: Shanghai Normal University, 2010: 142–143 (in Chinese)

---

**作者简介** 王晓红,女,1974年生,博士研究生,讲师。主要从事入侵植物生理生态学研究。E-mail: wxh00050410@163.com

**责任编辑** 孙菊

---