

冯渊圆, 胡海波, 祝文斌, 等. 苏北沿海林农复合经营系统环境特征及农作物光合特性[J]. 江苏农业学报, 2019, 35( 1 ): 96-102.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2019.01.014

# 苏北沿海林农复合经营系统环境特征及农作物光合特性

冯渊圆<sup>1</sup>, 胡海波<sup>1,2</sup>, 祝文斌<sup>3</sup>, 徐筱芃<sup>4</sup>, 赵婷婷<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 江苏省水土保持与生态修复实验室, 江苏 南京 210037; 3. 大丰区沿海林场, 江苏 大丰 224100; 4. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 为增强沿海防护林的防灾、抗灾能力, 提高其生态、经济和社会效益, 本研究以乌桕-高粱和榉树-高粱 2 种林农复合经营系统为研究对象, 通过野外模拟试验, 研究其环境特征和农作物光合特性。结果表明, (1) 在相同立地条件下, 乌桕-高粱复合经营系统树木的树高、胸径生长率和林木成活率均大于榉树-高粱复合经营系统。(2) 乌桕-高粱复合经营系统较榉树-高粱复合经营系统更利于降低林地光照度; 前者调节空气湿度功能强, 空气湿度为 58.13%, 高于榉树-高粱复合经营系统。(3) 高粱叶片净光合速率随着光照度的增加迅速升高, 在乌桕林-高粱复合经营系统中高粱叶片净光合速率最大值为 23.15  $\mu\text{mol}/(\text{m} \cdot \text{s})$ , 比榉树-高粱复合经营系统中高粱高 22.64%; 2 种林农复合经营系统中高粱叶片气孔导度变化趋势相近, 差异不显著; 乌桕-高粱复合经营系统中高粱胞间  $\text{CO}_2$  浓度日均值比榉树-高粱复合经营系统中高粱低 3.10%; 乌桕-高粱复合经营系统中高粱日均蒸腾速率较榉树-高粱复合经营系统中高粱低 3.44%。(4) 影响高粱叶片光合作用的因素主要是净光合速率、气孔导度和蒸腾速率, 其次是以空气温度为主的环境因子。在苏北沿海盐渍土上, 乌桕-高粱复合经营系统较榉树-高粱复合经营系统更适合高粱生长, 且改善环境功能更强。

**关键词:** 苏北沿海; 林农复合经营; 高粱; 光合特性

**中图分类号:** S344.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)01-0096-07

## Study on environmental characteristics and photosynthesis characteristics of crops for agroforestry management systems in northern Jiangsu province

FENG Yuan-yuan<sup>1</sup>, HU Hai-bo<sup>1,2</sup>, ZHU Wen-bin<sup>3</sup>, XU Xiao-peng<sup>4</sup>, ZHAO Ting-ting<sup>1</sup>

(1. Nanjing Forestry University Southern Modern Forestry Collaborative Innovation Center, Nanjing 210037, China; 2. Jiangsu Province Soil and Water Conservation and Ecological Restoration Laboratory, Nanjing 210037, China; 3. The Coastal Forest Farm of Dafeng District, Dafeng 224100, China; 4. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** In order to enhance the disaster prevention and resilience of coast protection forest and improve the ecological, economic and social benefits, the *Sapium sebiferum-Sorghum* and *Zelkova schneideriana-Sorghum* were used as the research objects, and the environmental characteristics and photosynthesis characteristics were studied. The results showed that under the same site conditions, the tree height, diameter growth-rate and survival rate of trees in the *S. sebiferum-Sorghum* compound management system were higher than those in the *Z. schneideriana-Sorghum* compound management system. The *S. sebiferum-Sorghum* compound management system was than the *Z. schneideriana-Sorghum* com-

收稿日期: 2018-09-28

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[ CX(17)1004 ]; 国家林业局长江三角洲森林生态系统定位研究项目(2017-LYPT-DW-155); 江苏省高等学校林学优势学科建设项目(164010641)

作者简介: 冯渊圆(1992-), 女, 江苏无锡人, 硕士, 研究实习员, 主要从事水土保持、林业生态工程研究。(E-mail) fyy.745333912@qq.com

通讯作者: 胡海波, (E-mail) huhb2000@aliyun.com

pound management system, and had stronger function of adjusting air humidity. The air humidity of *S.sebiferum* forest was 58.13%, which was higher than that of *Z.schneideriana* forest. The net photosynthetic rate of sorghum leaves increased rapidly with the increase of light intensity. In the *S. sebiferum* forest, the maximum net photosynthetic rate of sorghum leaves was  $23.15 \mu\text{mol}/(\text{m} \cdot \text{s})$ , which was 22.64% higher than that in *Z. schneideriana* forest. The stomatal conductance of sorghum leaves in the two agroforestry systems was similar, and the difference was not significant. The daily average of intercellular  $\text{CO}_2$  concentration in *S. sebiferum* forest was 3.10% lower and the transpiration rate was 3.44% lower than that in *Z. schneideriana* forest, respectively. Physiological factors were the main factors that affected the photosynthesis of sorghum leaves, followed by the environmental factors mainly based on air temperature. In summary, in the saline soil of the northern Jiangsu coast, the *S. sebiferum*-Sorghum compound management system was more suitable for sorghum growth than *Z. schneideriana*-Sorghum management system, and it was more powerful for improving the environment.

**Key words:** the coastal areas of northern Jiangsu province; agroforestry management; sorghum; photosynthetic characteristics

中国苏北沿海地区地理位置优越,土地资源丰富,但土壤盐分含量高,立地条件差,迫切需要大力开展植树造林,加强沿海防护林体系建设、提高防灾减灾能力。高粱(*Sorghum bicolor*)作为许多国家的主要农作物之一,具有很强的耐瘠、耐盐碱特性,适宜在盐碱干旱等边际土地上大规模种植<sup>[1]</sup>。研究结果表明,林农复合经营系统可充分发挥生态、经济效益,因此研究不同林农复合经营模式对农作物生长的影响具有重要意义。

目前,关于林木与高粱复合经营对高粱光合作用影响的研究比较少。乌桕(*Sapium sebiferum*)是中国特有木本油料树种,至今已有一千多年栽培历史,在中国分布广泛,生态、经济价值都较高<sup>[2]</sup>,并且乌桕林下套种作物试验已逐步开展<sup>[3]</sup>。榉树(*Zelkova schneideriana*)是优良的用材、景观树种,适应性和抗风力强,并且耐烟尘,适用于防风林营造<sup>[4]</sup>。因此,本研究选取乌桕-高粱和榉树-高粱2种不同林农复合经营系统,研究其环境特征、高粱光合作用及其他生理生态特性的变化趋势,探讨高粱在不同林农复合经营条件下光合作用规律,为苏北沿海防护林体系建设提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与材料

试验地位于盐城市大丰沿海林场,地理位置 $33^{\circ}26' \sim 33^{\circ}36' \text{N}$ ,  $120^{\circ}31' \sim 120^{\circ}52' \text{E}$ ,地处滨海平原区,为亚热带与暖湿带的过渡地带,由于东临黄海,属于湿润的季风气候区,雨量充沛。多年平均气温 $14.1^{\circ}\text{C}$ ,无霜期209 d,常年降水量1 068 mm。土壤多为滨海潮土,表土含盐量 $0.20\% \sim 0.25\%$ ,pH 值为

8.0~9.5。

试验林为乌桕-高粱和榉树-高粱2种林农复合经营模式,地形地貌、潜水埋深、土壤条件和人为经营措施等一致。林木平均树高分别为3.10 m和2.87 m,平均地径分别为36.03 mm和38.39 mm,均为3年生幼林,株行距 $5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。试验林于2016年3月中旬种植,栽植时浇透定根水。2017年春季播种高粱于试验林内,播种前进行整地除草,耕犁深度12~15 cm,除去杂草,并耙平土面。采用挖穴种植,距林木水平带边缘50~80 cm进行挖穴,穴间距30~40 cm,穴深4~6 cm,把种子均匀播于穴内然后覆土约3 cm。2017年9月至10月,测定乌桕和榉树生长状况,高粱的光合作用及其环境因子。

### 1.2 测定方法

1.2.1 林木生长指标的测定 采用精度1 cm的卷尺测定树高,精度0.02 mm的游标卡尺测定胸径,各测30株,计算树高和胸径增长率,增长率=(测定值-初始值)/初始值,初始值为林木栽植时的树高或胸径。

1.2.2 光合特性和环境因子测定 2017年9月~10月,每周测定1次,选择晴朗无云天气,利用Li-6400便携式光合作用测量系统(LI-COR, USA),在测定日的8:00至18:00,每隔2 h测定1次,每次选取3株健康生长的高粱,每株选取相同部位且没有病斑的3组叶片进行测定,每组叶片重复测定3次,取平均值进行分析。环境因子参数包括光合有效辐射(PAR)、空气温度、相对湿度和大气 $\text{CO}_2$ 浓度,生理生态指标主要包括净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )。

1.2.3 数据统计和分析 使用Microsoft Excel 2013软件进行数据处理和表格制作等,使用Sigmaplot12.0

制图,采用 SPSS 22.0 软件进行数据统计与分析等。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林农复合经营系统林木生长状况

经过 1 年多的生长,2 种林农复合经营系统中林木生长状况如表 1 所示。乌柏树高、生长率和胸径生长率明显高于榉树,说明林农复合经营系统中

乌柏长势好于榉树。另外乌柏的平均成活率为 75%,榉树平均成活率为 60%,表明乌柏较榉树更适应沿海土壤条件。

林分郁闭度是反映林分结构与密度的重要指标。由表 1 可以看出,林农复合经营系统中乌柏的林分郁闭度高于榉树,这表明乌柏的枝叶更加茂密,遮荫能力更强。

表 1 不同林农复合经营系统林木生长状况

Table 1 Growth of trees in different agroforestry compound management systems

复合经营系统	初始树高(m)	树高生长率	初始胸径(mm)	胸径生长率	成活率(%)	林分郁闭度
乌柏-高粱	3.00±0.23	0.15±0.02	36.03±0.35	0.13±0.04	75	0.30
榉树-高粱	2.82±0.11	0.07±0.01	38.39±0.52	0.04±0.02	60	0.23

### 2.2 不同林农复合经营系统的环境特征

2.2.1 不同林农复合经营系统对光合有效辐射的影响 2 个林农复合经营系统光合有效辐射总体上呈单峰变化趋势(图 1)。由图 1 可以看出,两者均在 12:00 达到峰值。乌柏-高粱复合经营系统光合有效辐射普遍低于榉树-高粱,12:00 时前者比后者低 12.76%,两者数值差达到一天中最大值,这是因为乌柏的遮荫效果比榉树好,正午更为明显。

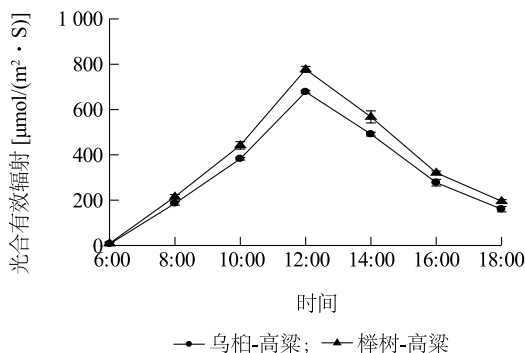


图 1 不同林农复合经营系统光合有效辐射日变化

Fig.1 Diurnal change of photosynthetically active radiation (PAR) in different agroforestry compound management systems

#### 2.2.2 不同林农复合经营系统对空气温度的影响

2 种林农复合经营系统林地内的空气温度随着时间的变化先增加后降低(图 2)。由图 2 可以看出,清晨初始空气温度相近,2 种林农复合经营系统间空气温度没有明显差异,两者均在 12:00-14:00 达到最大值,然后逐渐降低。12:00-18:00,乌柏-高粱复合经营系统林地的空气温度日

平均值为 27.56℃,比榉树-高粱复合经营系统林地低 4.52%。这是因为乌柏叶面积较大,遮荫效果更好,蒸腾作用较强,能更好地调节空气温度。

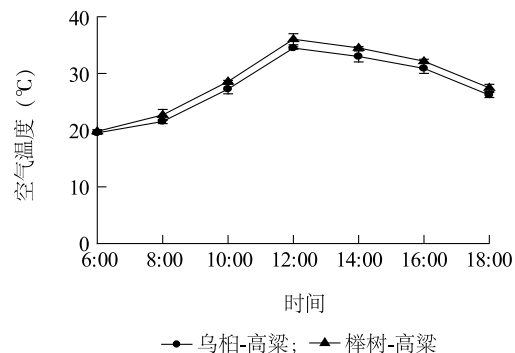


图 2 不同林农复合经营系统林地空气温度日变化

Fig.2 Diurnal change of air temperature in different agroforestry compound management systems

#### 2.2.3 不同林农复合经营系统对大气 CO<sub>2</sub> 浓度的影响

2 种林农复合经营系统林地内大气 CO<sub>2</sub> 浓度相差不大(图 3)。由图 3 可以看出,两者变化规律均为 6:00-10:00 数值较高,10:00-14:00 大气 CO<sub>2</sub> 浓度偏低,之后略微升高,这是因为晚上叶片释放的 CO<sub>2</sub> 多,白天光合作用消耗,但随着下午阳光强度下降,光合作用减弱,CO<sub>2</sub> 消耗量随之降低。方差分析结果表明,2 种林农复合经营系统内大气 CO<sub>2</sub> 浓度日平均值没有明显差异。

#### 2.2.4 不同林农复合经营系统对空气相对湿度的影响

2 种林农复合经营系统空气相对湿度的变化规律为清晨和傍晚相对较高(图 4)。由图 4 可以看出,随着气温的升高,空气湿度逐渐降低,在 14:00

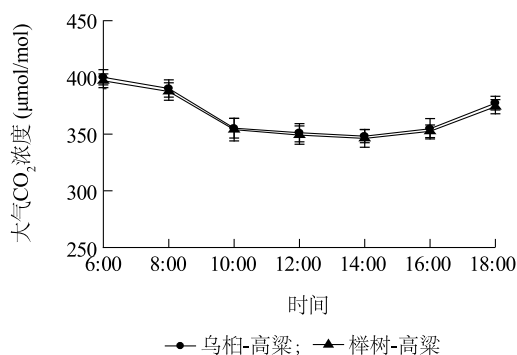


图3 不同林农复合经营系统大气二氧化碳浓度日变化

Fig.3 Diurnal change of atmospheric carbon dioxide concentration in different agroforestry compound management systems

左右达到最低值,随后又随着温度降低,空气相对湿度开始上升。乌柏-高粱复合经营系统空气相对湿度比榉树-高粱高 9.55%,这与乌柏叶面积较大、遮荫效果好有关。变化趋势与空气温度相反,但是具体时间不一致。

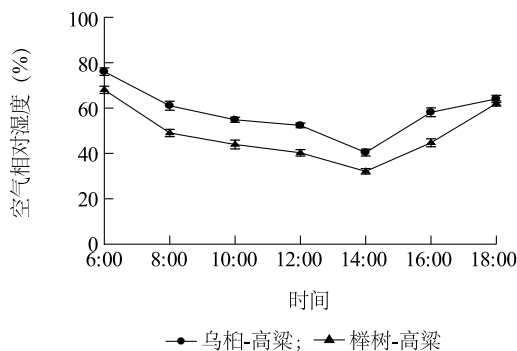


图4 不同林农复合经营系统空气相对湿度日变化

Fig.4 Diurnal change of air relative humidity in different agroforestry compound management systems

## 2.3 不同林农复合经营系统高粱的光合特性

2.3.1 不同林农复合经营系统对高粱净光合速率的影响 图5为2种林农复合经营系统高粱叶片净光合速率日变化情况。由图5可知,2种林农复合经营系统中高粱叶片净光合速率随着光照度的增加迅速升高,在一定的空气温度和二氧化碳供应充足的情况下,光合作用强度随着光照增强而增强,在12:00达到峰值,随后逐渐下降,这与前人的研究相一致<sup>[5-6]</sup>。乌柏-高粱复合经营系统中高粱叶片净光合速率最大值为  $23.15 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,比榉树-高粱复合经营系统中高 22.64%,可能是因为乌柏改变了高粱生长的微环境,更有利于高粱的光合作用,导

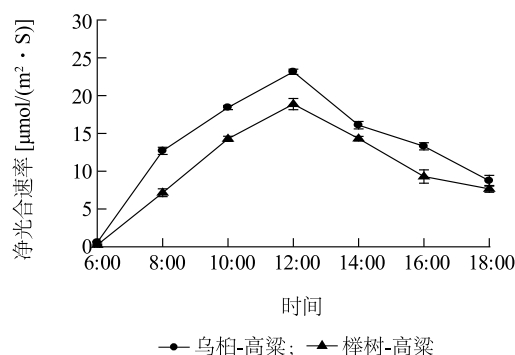


图5 不同林农复合经营系统中高粱净光合速率日变化

Fig.5 Diurnal change of net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of sorghum in different agroforestry compound management systems

致净光合速率升高。

2.3.2 不同林农复合经营系统对高粱气孔导度的影响 由图6可知,乌柏-高粱和榉树-高粱2种复合经营系统中,高粱叶片气孔导度变化趋势相近,差异不明显。乌柏-高粱复合经营系统中气孔导度日均值为  $0.171 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,相对于榉树-高粱复合经营系统中低 6.98%。2种林农复合经营系统中高粱气孔导度呈双峰曲线,均在10:00达到最高的峰值,在14:00左右达第二峰值,前者大于后者。

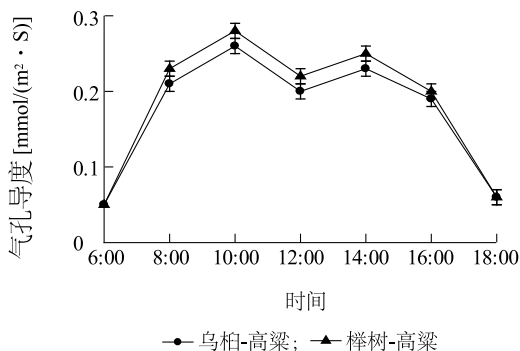
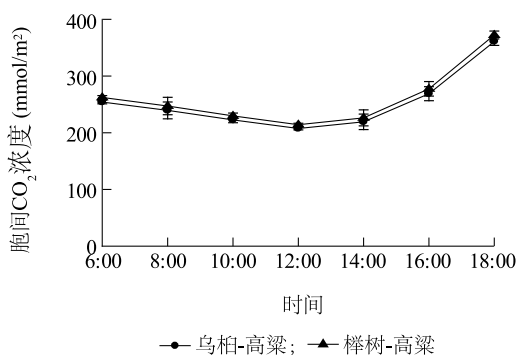


图6 不同林农复合经营系统中高粱气孔导度日变化

Fig.6 Diurnal change of stomatal conductance ( $G_s$ ) of sorghum in different agroforestry compound management systems

2.3.3 不同林农复合经营系统对高粱胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的影响 2种林农复合经营系统中高粱胞间 CO<sub>2</sub> 浓度均在上午缓慢降低,在12:00左右达到最小值,随之快速上升(图7)。高粱叶片不会出现“午休”现象,气孔不会闭合,长时间的强光照不会引起叶片光合强度的降低,所以上午趋势较为平缓。乌柏-高粱复合经营系统中高粱胞间 CO<sub>2</sub> 浓度日均值为 253.28



图7 不同林农复合经营系统中高粱胞间  $\text{CO}_2$  浓度日变化Fig.7 Diurnal change of intercellular  $\text{CO}_2$  concentration of sorghum in different agroforestry compound management systems

$\text{mol/m}^2$ , 比榉树-高粱复合经营系统中低 3.10%。

2.3.4 不同林农复合经营系统对高粱蒸腾速率的影响 在乌柏-高粱和榉树-高粱复合经营系统中, 高粱的蒸腾速率相差不大, 变化趋势较一致, 上午 10:00 和下午 14:00 均出现峰值 (图 8)。乌柏-高粱复合经营系统中, 高粱叶片的日均蒸腾速率为  $3.97 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 较榉树-高粱复合经营系统中低 3.44%。

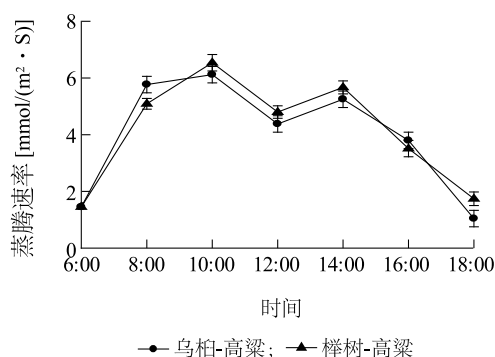


图8 不同林农复合经营系统中高粱蒸腾速率日变化

Fig.8 Diurnal change of transpiration rate ( $T_r$ ) of sorghum in different agroforestry compound management systems

## 2.4 影响高粱叶片光合作用的综合因子分析

对 2 种林农复合经营系统影响高粱光合作用的环境因子和生理因子进行相关分析。从表 2 可以看出, 林地各环境因子之间呈极显著相关 ( $P < 0.01$ )。高粱净光合速率与  $PAR$ 、蒸腾速率  $T_r$ 、气孔导度  $G_s$  均表现出显著正相关性 ( $P < 0.05$ ), 与空气湿度、 $C_a$  呈显著负相关性 ( $P < 0.05$ )。说明  $PAR$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  对叶片光合作用有益, 而空气相对湿度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度越大, 对高粱净光合速率越不利。

表 2 高粱叶片生理因子与环境因子的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between physiological factors and environmental factors of sorghum

指标	光合有效辐射 ( $PAR$ )	空气温度 ( $T$ )	空气相对湿度 ( $RH$ )	$\text{CO}_2$ 浓度 ( $C_a$ )	净光合速率 ( $P_n$ )	气孔导度 ( $G_s$ )	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 ( $C_i$ )	蒸腾速率 ( $T_r$ )
光合有效辐射 ( $PAR$ )	1.000							
空气温度 ( $T$ )	0.894 **	1.000						
空气相对湿度 ( $RH$ )	-0.804 **	-0.781 **	1.000					
$\text{CO}_2$ 浓度 ( $C_a$ )	-0.853 **	-0.944 **	0.803 **	1.000				
净光合速率 ( $P_n$ )	0.884 **	0.766 **	-0.625 **	-0.809 **	1.000			
气孔导度 ( $G_s$ )	0.683 **	0.520	-0.799 **	-0.674 **	0.725 **	1.000		
胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 ( $C_i$ )	-0.554 *	-0.279	0.474 *	0.347	-0.508 *	-0.706 **	1.000	
蒸腾速率 ( $T_r$ )	0.614 *	0.384	-0.710 **	-0.549 *	0.691 **	0.969 **	-0.729 **	1.000

\*\* 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。\* 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关。

基于对主成分的提取采取特征值大于 1 的原则, 对影响高粱光合作用的各因子进一步主成分分析 (表 3)。由表 3 可以看出, 影响高粱进行光合作用的 8 个指标经提取后降维为 2 个主成分, 累计方差贡献率达 88.319%, 可以较好地解释影响高粱光合作用的原因。

由荷载矩阵可以看出, 在影响高粱叶片光合

作用的第一主成分中, 生理指标中的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  是主要的影响因子; 在第二主成分中, 环境因子中的空气温度和生理指标中的  $C_i$  起主要的影响作用 (表 4)。因此, 对于高粱来说, 影响其叶片光合作用的主要是生理因子, 直接影响高粱光合作用; 其次是以空气温度为主的环境因子, 间接影响光合作用。

表 3 影响高粱光合作用各因子的解释方差矩阵

Table 3 The total variance matrix of the factors affecting photosynthesis in sorghum

成份	初始特征值			提取载荷平方和		
	合计	方差百分比(%)	累积(%)	合计	方差百分比(%)	累积(%)
1	5.815	72.693	72.693	5.815	72.693	72.693
2	1.250	15.626	88.319	1.250	15.626	88.319
3	0.443	5.543	93.862			
4	0.327	4.082	97.944			
5	0.124	1.554	99.498			
6	0.017	0.211	99.709			
7	0.014	0.179	99.887			
8	0.009	0.113	100.000			

表 4 影响高粱光合速率因子的荷载矩阵

Table 4 Rotated component matrix of the factors affecting photosynthetic rate in sorghum

指标	主成分	
	1	2
光合有效辐射	0.160	0.174
空气温度	0.143	0.428
相对湿度	-0.152	-0.059
大气二氧化碳浓度	-0.153	-0.304
净光合速率	0.153	0.085
气孔导度	0.153	-0.303
胞间二氧化碳浓度	-0.113	0.475
蒸腾速率	0.141	-0.407

3 讨论

苏北沿海特殊的立地条件对林农复合经营系统的植物生长有很大影响。本研究发现,不同复合经营系统中林木生长状况各异,乌桕树高和胸径的生长率比榉树高,乌桕平均成活率为 75%,榉树平均成活率为 60%。复合经营对林下微环境有一定影响,包括光照、水分、温度、营养物质和 CO<sub>2</sub> 浓度等。白超等研究结果表明,微环境取决于林分结构,林分结构是决定林木生态位的关键要素,林木的活力又由其所处的微环境决定<sup>[7]</sup>。遮荫可以改善系统内林木和作物的生长环境,光合有效辐射是植物光合作用的能量来源,也是影响光合作用的最根本因素<sup>[8]</sup>。宋西德等<sup>[9]</sup>对杨粮复合经营系统的研究结

果表明,光照是影响农作物生长和产量的主要因素之一。彭小博研究发现,由于林冠遮挡作用,地面空气速度和强度减弱,导致林下微环境空气湿度、温度等发生变化<sup>[10]</sup>。

本研究结果表明,乌桕林下光照度比榉树林下弱,2 种林农复合经营系统大气 CO<sub>2</sub> 浓度的变化差异不大,空气温、湿度与林木遮荫度和作物种类有关。一方面是由于林冠遮蔽,降低了空气温度,而空气温度与相对湿度呈负相关;另一方面,由于林农复合经营系统林地内风速降低,植物蒸腾的水汽不易扩散,从而提高了林农复合经营系统空气湿度。进一步分析可知,由于乌桕林的遮荫和高粱对光辐射的吸收,使林内光辐射强度低,热辐射较小,蒸发、蒸腾量小,降低了高粱的蒸腾作用,使乌桕-高粱复合经营系统的小气候向着有利于林木和作物生长的方向演变。

植物的光合作用是一个非常敏感的生理过程,环境因子的改变会导致植物光合生理特征的变化<sup>[11]</sup>,进而影响光合作用<sup>[12-13]</sup>。段志平等<sup>[15]</sup>研究发现,间作系统中随着树龄和树冠体积的增大,遮荫造成的弱光胁迫成为影响间作作物生长发育的重要因素。范元芳等<sup>[14]</sup>研究发现,玉米-大豆带状间作时荫蔽是影响大豆生长和光合特性的关键因素。本研究结果表明,乌桕林高粱净光合速率较榉树林的高,净光合速率数值差距较榉树林大。气孔导度对环境因子的变化十分敏感,影响光合作用的各种因素都可能对气孔导度造成影响,另外由于间作作物降低了风速,也一定程度上影响了蒸腾速率,本研究

中叶片蒸腾速率与气孔导度日均值变化基本一致。高粱叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度呈“V”型变化曲线,在 12:00 达到最小值,表现出与气孔导度相反的趋势。

环境因子之间、光合生理因子之间及环境因子与光合生理因子之间均存在着一定的相关性<sup>[16-17]</sup>。本研究结果表明,林农复合经营系统各环境因子之间呈极显著相关( $P < 0.01$ ),各环境因子和生理因子同高粱净光合速率之间都表现出显著相关性。对高粱叶片净光合速率影响最大的环境因子是  $PAR$ ,其次是大气  $\text{CO}_2$  浓度。

主成分分析结果表明,影响高粱光合作用的主要是生理因子,其次是以空气温度为主的环境因子。可见,环境因子和作物生理因子并非孤立存在,而是相互作用的。本研究中 2 种林农复合经营系统中高粱光合作用效率的高低,是外界生态环境与作物内在生理机能相互作用的结果,这与前人的研究结果一致<sup>[18-21]</sup>。

综合 2 种林农复合经营系统在盐渍化土壤条件下的林木生长状况、林地微环境和高粱光合特性,发现在乌柏和榉树 2 个树种中,乌柏在沿海盐渍化土壤上表现出了更强的适合性。因此,乌柏-高粱林农复合经营系统可能更适合在沿海地区推广。

#### 参考文献:

- [1] 黎大爵. 亟待开发的甜高粱酒精燃料[J]. 中国农业科技导报, 2003(4): 48-51.
- [2] 李斌超, 文宏升, 虞涛, 等. 乌柏林丰产营造技术[J]. 现代农业科技, 2011(11): 222-223.
- [3] 黄惠坤. 乌柏林套种作物试验初报[J]. 广西植物, 1988(4): 371-374.
- [4] 任全进, 陈聪, 王富献, 等. 榉树林下间套种经济植物的模式及技术[J]. 现代农业科技, 2014(23): 189-190.
- [5] MCMINN A, RYAN K, GADEMANN R. Diurnal changes in photosynthesis of Antarctic fast ice algal communities determined by pulse amplitude modulation fluorometry[J]. Marine Biology, 2003, 143(2): 359-367.
- [6] 廖兴国, 言议超, 郭圣茂. 无患子夏季光合速率日变化研究[J]. 绿色科技, 2016(15): 61-62.
- [7] 白超, 赵中华, 胡艳波. 基于交角的林木竞争指数应用研究[J]. 农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(7): 138-145.
- [8] 王会提, 曾凡江, 张波, 等. 不同种植方式下桉柳光合生理参数光响应特性研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 753-762.
- [9] 宋西德, 刘粉莲, 张永. 黄土丘陵沟壑区林农复合生态系统立体经营系统研究[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(4): 43-46.
- [10] 彭小博. 锥栗与多花黄精复合经营生态经济效益[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [11] 陈世伟, 刘旻霞, 贾芸, 等. 甘南亚高山草甸围封地群落演替及植物光合生理特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(4): 343-351.
- [12] 李文文, 黄秦军, 丁昌俊, 等. 南方型和北方型美洲黑杨幼苗光合作用的日季节变化[J]. 林业科学研究, 2010, 23(2): 227-233.
- [13] PASQUINI S C, WRIGHT S J, SANTIAGO L S. Lianas always outperform tree seedlings regardless of soil nutrients: results from a long-term fertilization experiment[J]. Ecology, 2015, 96(7): 1866-1876.
- [14] 范元芳, 刘沁林, 王锐, 等. 玉米-大豆带状间作对大豆生长、光合荧光特性及产量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(5): 972-978.
- [15] 段志平, 刘天煜, 张永强, 等. 离树间距对枣麦间作小麦光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(11): 1445-1452.
- [16] 孙飞翔, 党坤良, 李明雨. 秦岭南坡森林抚育对锐齿栎林光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 117-124.
- [17] GAGO J, DALOSO D, FIGUEROA C M, et al. Relationships of leaf net photosynthesis, stomatal conductance, and mesophyll conductance to primary plant metabolism: a multi-species meta-analysis approach[J]. Plant Physiology, 2016, 171(1): 265-279.
- [18] 张淑勇, 夏江宝, 张光灿, 等. 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2519-2528.
- [19] 王冉, 李素英, 任丽娟, 等. 锡林浩特草原区 27 种植物净光合速率影响因素的多因子分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 272-278.
- [20] 张华, 康雅茸, 徐春华. 兰州银滩黄河湿地 4 种植物的光合特性[J]. 草业科学, 2016, 33(4): 622-634.
- [21] 裴磊, 王振华, 郑旭荣, 等. 氮肥对北疆滴灌复播青贮玉米光合特性及养分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 176-182.

(责任编辑:陈海霞)