

真红树植物的净光合速率与其相关生理生态因子的关系

曾群英¹, 刘素青¹, 李林峰¹, 黄剑坚²

(1. 广东海洋大学 农学院, 广东 湛江 524094; 2. 广东海洋大学 寸金学院, 广东 湛江 524088)

摘要:为探讨真红树植物光合生理生态特性,以常见真红树林树种为研究对象,用 Li-6400 便携式光合仪测定了净光合速率(Pn)日变化、光合有效辐射(PAR)、气孔导度(Gs)、叶片细胞间 CO_2 浓度(Ci)、叶面温度(Tl)、叶面水气压亏缺(Vpd)、蒸腾速率(Tr)等指标。结果表明:1)白骨壤、木榄、桐花树、无瓣海桑的 Pn 日变化呈“双峰”趋势,秋茄的接近“双峰”,红海榄为“单峰”;2)以 Gs (X_1)、 Ci (X_2)、 Tr (X_3)、 Vpd (X_4)、PAR (X_5)、 Tl (X_6) 与 Pn (Y) 进行多元逐步分析得最优回归方程,白骨壤: $Y=4.419+0.07X_5-6.429X_4+0.813X_6-0.064X_2+0.668X_3$ ($R=0.969^{**}$),红海榄: $Y=-8.035+32.787X_1-0.053X_2-3.503X_4+0.945X_6$ ($R=0.963^{**}$),木榄: $Y=13.528+40.28X_1-0.045X_2$ ($R=0.938^{**}$),秋茄: $Y=21.211-0.055X_2+18.951X_1+0.001X_5$ ($R=0.975^{**}$),桐花树: $Y=63.637-0.448X_1-0.053X_2+1.995X_3+1.770X_4+0.001X_5-1.461X_6$ ($R=0.990^{**}$),无瓣海桑: $Y=27.368-0.067X_2+20.081X_1$ ($R=0.985^{**}$);3)白骨壤的 Pn 与 Ci 和 PAR 相关关系最强,其中与 Ci 是负相关关系,与 PAR 是正相关关系。红海榄、木榄和无瓣海桑的 Gs 和 Ci 对 Pn 的影响最大,分别是正相关和负相关。秋茄 Ci 与 Pn 的相关关系最强,为负相关。桐花树 Ci 、 Tr 及 Tl 与其 Pn 的偏相关显著性水平高。

关键词:真红树植物;净光合速率;光合特性

中图分类号:S718.54 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)03-0028-07

Analysis of Net Photosynthetic Rate and Related Physio-ecological Factors
of Mangrove Trees in Zhanjiang

ZENG Qun-ying¹, LIU Su-qing¹, LI Lin-feng¹, HUANG Jian-jian²

(1. Agriculture College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524094, China;

2. Cunjin College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China)

Abstract: A portable photosynthetic system (Li-6400) was used to measure the diurnal changes of net photosynthetic rate (Pn), photosynthetic active radiation (PAR), stomata conductance (Gs), intercellular carbon dioxide concentration (Ci), leaf temperature (Tl), vapor pressure deficit at the leaf surface (Vpd), transpiration rate (Tr) of mangrove plant in sunny day. The results showed as follow: 1) the diurnal variation Pn of *Avicennia marina*, *Bruguiera gymnorhiza*, *Aegiceras corniculatum* and *Sonneratia apetala* appeared a trend of “double peaks”, the diurnal change of *Kandelia candel* closed to “double peaks”, *Rhizophora stylosa* was “single peak”. 2) The optimal regression equations of each species were obtained by multiple stepwise analysis: *A. marina*, $Y=4.419+0.07X_5-6.429X_4+0.813X_6-0.064X_2+0.668X_3$ ($R=0.969^{**}$); *R. stylosa*, $Y=-8.035+32.787X_1-0.053X_2-3.503X_4+0.945X_6$ ($R=0.963^{**}$); *B. gymnorhiza*, $Y=13.528+40.28X_1-0.045X_2$ ($R=0.938^{**}$); *K. candel*: $Y=21.211-0.055X_2+18.951X_1+0.001X_5$ ($R=0.975^{**}$), *Aegiceras corniculatum*, $Y=63.637-0.448X_1-0.053X_2+1.995X_3$

收稿日期:2014-08-16 修回日期:2014-11-08

基金项目:广东省自然科学基金(S2012010008703, S2013020012779);广东省海洋渔业科技推广专项基金(2011011I02, A201201I02, A201308E01);广东省科技计划项目(2012B060400017);广东省教育厅育苗工程项目(2013LYM_0108)。

作者简介:曾群英,女,高级实验师,硕士,研究方向:森林经理学。E-mail:2633832321@qq.com

$+1.770X_4 + 0.001X_5 - 1.461X_6$ ($R = 0.990^{**}$); *S. apetala*: $Y = 27.368 - 0.067X_2 + 20.081X_1$ ($R = 0.985^{**}$). 3) *Pn* of *Avicennia marina* had the strongest correlation with *Ci* and *PAR*, which was negatively correlated with *Ci*, and positively with *PAR*. *Gs* and *Ci* of *R. stylosa*, *B. gymnorhiza* and *S. apetala* exhibited maximum impacts to *Pn*, and positively and negatively correlated, respectively. Correlation between *Ci* and *Pn* of *K. candel* had the strongest negative correlation. *Ci*, *Tr* and *Tl* of *Aegiceras corniculatum* had high level of partial correlation significance with *Pn*.

Key words: mangrove tree; net photosynthetic rate; photosynthesis

随着 CO_2 和气温的升高,造成森林生长期延长;加之氮沉降和营林措施的改变等因素,使森林年均固碳能力呈稳定增长趋势,森林固碳能力明显增强^[1-2]。而通过森林固碳来减少大气中 CO_2 的浓度是国际公认的缓解温室效应的有效途径^[3]。森林在全球碳循环中发挥着重要作用,树木通过光合作用固定 CO_2 并能够长期保存^[4]。光合作用是植物最基本的生命活动,是将太阳能转换为化学能的过程,是植物内最重要的化学反应,也是地球上规模最大的生物合成过程^[5-6],其强弱受到树木的自身遗传特性及外部环境条件的影响^[7]。影响净光合速率的生理生态因子主要有光合有效辐射、胞间 CO_2 浓度、气孔导度、叶面水气压亏缺、叶温等^[8]。

近年来,不少国内外的学者对真红树植物的研究主要集中在生物多样性保护、土壤、生态价值评价、病虫害、生物空间结构保护、生物量、生产量、碳储量等方面,而对真红树植物的光合速率的研究不多。本研究通过测定秋茄(*Kandelia candel*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、红海榄(*Rhizophora stylosa*)、无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)等 6 种真红树植物光合速率,分析树种光合日变化和相关生理生态因子比较等数据,探寻各树种的光合特性和影响真红树植物光合日变化的相关

因子,为对真红树植物的保护和固碳的研究提供参考依据。

1 研究地概况

特呈岛位于广东省湛江市霞山区东南港湾($110^{\circ}24'53''$ — $110^{\circ}26'28''\text{E}$, $20^{\circ}09'$ — $20^{\circ}10'\text{N}$),北邻南三岛,南望东海岛,东临南海,西为我国八大港口之一的湛江港,是湛江港的天然屏障。该岛南北长 1.4 km,东西宽 2.7 km,海岸线长 7.4 km。该岛属北热带海洋性季风气候,长年温和湿润,平均气温 22.3℃,历年 1 月份平均气温最低,7 月份最高,全年无冬季。年日照时数约为 2 100 h,年均降雨量为 1 800~2 000 mm。夏秋盛行偏南风,常受台风侵袭,风力最大可达 12 级以上。冬、春盛行偏北风,极少受寒潮影响出现低温天气。特呈岛四周波浪浪高全年以 3 级(0.5~1.4 m)为主,潮间带为半日潮,潮高变化 27~469 cm^[8]。

2 材料与方法

2.1 试验材料

以木榄、秋茄、红海榄、白骨壤、桐花树和无瓣海桑等 6 种枝繁叶茂,生长良好,无病虫害的真红树植物单株为试验材料(表 1)。

表 1 树种的生物学特性

Table 1 Biological characteristics of several experimental species

种名	科	花期花色	生活型
秋茄(<i>K. candel</i>)	红树科	花期在 4—8 月间,花白色	灌木或小乔木,树皮灰褐且平滑;侧枝的气根向下发育为支柱根
木榄(<i>B. gymnorhiza</i>)	红树科	11 月,花淡黄色	常绿乔木,支柱根和呼吸根呈膝状
红海榄(<i>R. stylosa</i>)	红树科	夏季开花,花淡黄色	常绿灌木或小乔木,有发达的支柱根
白骨壤(<i>Avicennia marina</i>)	马鞭草科	花期 4—5 月间,花黄绿色	常绿乔木嫩枝有毛;叶背有白色茸毛,叶革质,椭圆形
桐花树(<i>Aegiceras corniculatum</i>)	紫金牛科	花期在 1—4 月,花白色	灌木或小乔木叶革质,倒卵形
无瓣海桑(<i>R. stylosa</i>)	海桑科	花期在 2—5 月,花丝白色	乔木主干圆柱形,呼吸根呈笋状且伸出水面

2.2 研究方法

于 2013 年 7 月 16 日采用美国 Li-Cor 公司制造的 LI-6400 便携式光合仪从 8:00—18:00,每隔 2 h 采用自然光探头对红海榄、秋茄、木榄、桐花树、无瓣海桑、白骨壤等 6 种真红树植物测定净光合速

率(*Pn*)、光合有效辐射(*PAR*)、气孔导度(*Gs*)、胞间 CO_2 浓度(*Ci*)、叶面温度(*Tl*)、叶面水气压亏缺(*Vpd*)、蒸腾速率(*Tr*)等参数。每个树种选 3 株,每株选择 3 片朝向一致、无病虫害的叶片,每片叶取 3~6 个瞬时光合速率值以及相关的参数值。

2.3 数据处理分析

将所得的数据进行简单相关分析,逐步回归分析以及偏相关分析。

3 结果与分析

3.1 净光合速率的日变化

随着时间变化,6种真红树植物的净光合速率也随之发生改变(图1)。红海榄净光合速率的日变化呈“单峰”曲线,峰值在10:00,其他呈“双峰”或近“双峰”型。秋茄净光合速率日变化则接近平缓的抛物线。白骨壤、木榄、桐花树和无瓣海桑等光合作用日进程趋势一致,在10:00左右第1个高峰,12:00时出现暂时的光合“午休”现象;桐花树和无瓣海桑在14:00达到第2个光合高峰,白骨壤和木榄在16:00时均达到第2个高峰。白骨壤、无瓣海桑、桐花树的第1峰值大于第2峰值,桐花树和木榄的第

2峰值大于第1峰值。通过比较净光合速率的日均值可得各树种的光合作用强弱顺序为:无瓣海桑>秋茄>白骨壤>桐花树>木榄>红海榄(表2)。

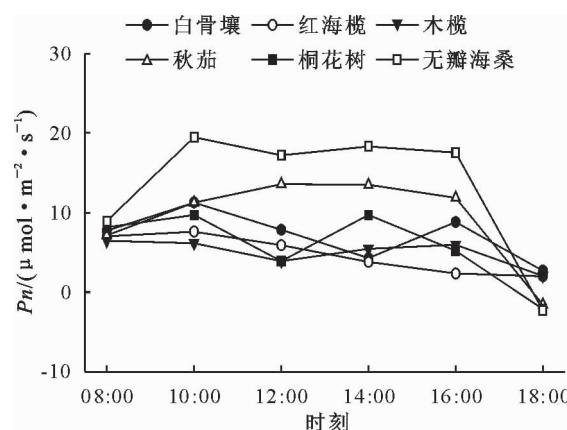


图1 净光合速率日变化

Fig. 1 Diurnal variation of P_n

表2 光合参数的日均值比较

Table 2 Comparison of daily mean photosynthetic parameters

树种	P_n /(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})	G_s /(mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})	C_i /(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})	L_s /(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})	T_r /(mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})	$VpdI/kPa$
白骨壤(<i>Avicennia marina</i>)	7.11±0.75bc	0.22±0.01ab	296.61±7.22a	0.22±0.02ab	4.41±0.32b	2.27±0.20a
红海榄(<i>R. stylosa</i>)	4.78±0.78ab	0.11±0.01a	293.08±4.84a	0.25±0.01bc	2.25±0.18a	2.35±0.18a
木榄(<i>B. gymnorhiza</i>)	5.00±0.32a	0.11±0.01a	287.89±4.97a	0.27±0.01c	2.35±0.16a	2.46±0.17a
秋茄(<i>K. candel</i>)	9.30±0.94c	0.20±0.01a	301.10±10.36ab	0.23±0.02ab	4.44±0.42b	2.12±0.12a
桐花树(<i>Aegiceras corniculatum</i>)	5.75±0.92ab	0.13±0.08ab	301.40±11.58ab	0.21±0.03ab	3.03±0.24a	2.59±0.17a
无瓣海桑(<i>R. stylosa</i>)	13.20±1.48d	0.34±0.02b	313.63±11.92b	0.17±0.03a	5.69±0.53c	1.83±0.10a

3.2 气孔导度的日变化

6种真红树的气孔导度的日变化(图2)与其净光合速率的日变化规律仅部分相似。红海榄的 G_s 日变化曲线呈单峰型,缓慢上升到10:00达到一天中的气孔导度的最高峰,之后平缓下降;白骨壤和桐花树的气孔导度日变化趋势大致相同,呈“双峰”型变化,峰值在08:00和14:00;木榄的峰值在08:00和16:00;秋茄的气孔导度日变化趋势与其净光合速率的日变化趋势接近一致;无瓣海桑的气孔导度日变化呈现双峰型,10:00和16:00是峰值。通过比较 G_s 日均值可得:无瓣海桑>白骨壤>秋茄>桐花树>木榄>红海榄(表2)。

3.3 胞间CO₂浓度的日变化

C_i 的日变化规律(图3)与 P_n 和 G_s 的日变化规律不同。6个树种在一开始皆呈下降趋势。秋茄和红海榄在12:00后的 C_i 降至最低值,16:00后红海榄下降,秋茄则急剧上升;木榄和无瓣海桑到14:00时开始上升,上升的趋势与秋茄趋势一致,木榄上升幅度小于无瓣海桑;白骨壤和桐花树的日变化曲线相似,开始上升的时间分别为12:00和

10:00,14:00时,二者均达到第1个峰值后先降低,在16:00时升高,此时,白骨壤达到最低值。总体来看,通过比较日均值可得:无瓣海桑>桐花树>秋茄>白骨壤>红海榄>木榄(表2), C_i 日变化值差异不显著。

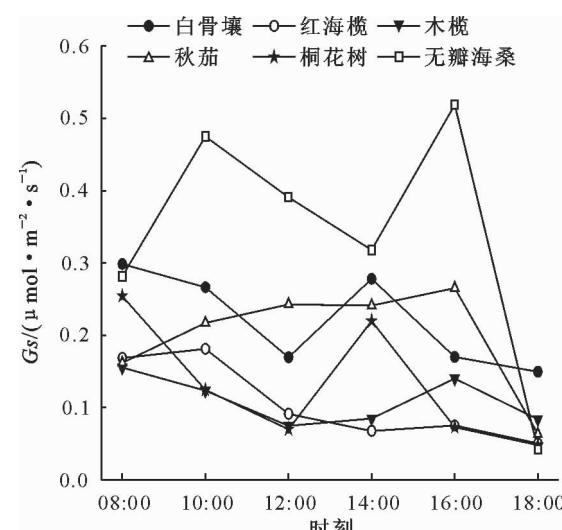
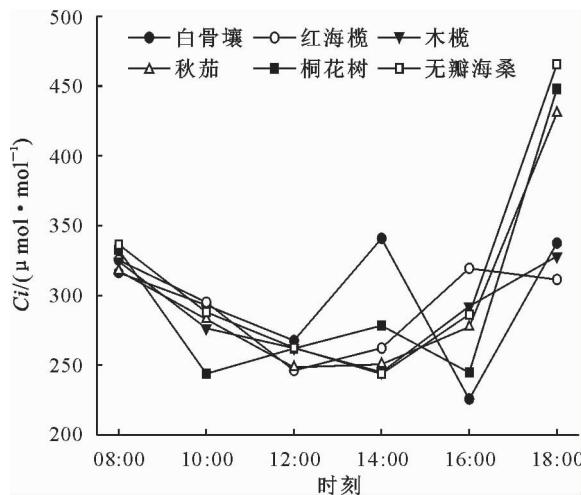


图2 气孔导度日变化

Fig. 2 Diurnal variation of G_s

图3 胞间CO₂浓度日变化Fig. 3 Diurnal variation of C_i

3.4 蒸腾速率的日变化

6种真红树植物的蒸腾速率日变化曲线均不相同(图4)。桐花树、木榄、红海榄的蒸腾速率的日变化曲线和气孔导度日变化曲线相似,白骨壤、红海榄的蒸腾速率日变化曲线和净光合速率日变化曲线相似。无瓣海桑、秋茄、木榄、桐花树、红海榄这5种真红树植物均呈现“单峰”型。白骨壤在12:00和16:00时分别到达了高峰,是双峰型。 Tr 日均值从大到小依次为:无瓣海桑>秋茄>白骨壤>桐花树>木榄>红海榄(表2)。蒸腾速率日变化值差异不显著。

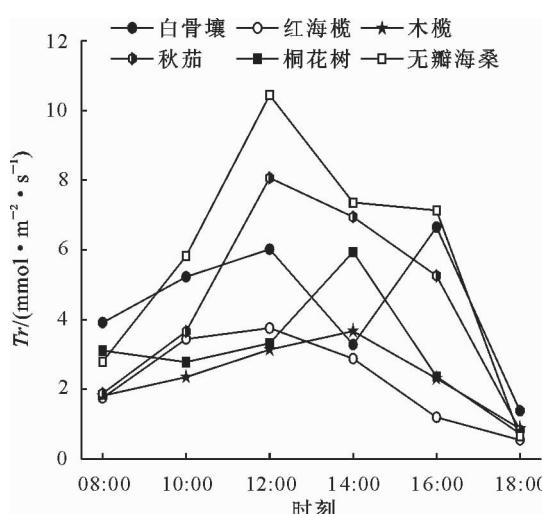


图4 蒸腾速率日变化

Fig. 4 Diurnal variation of Tr

3.5 叶面温度的日变化

叶面温度的日变化趋势基本一致(图5),均先上升后下降,除木榄时在14:00达到一天中叶面的最高温度外,其余的都在12:00达到叶面温度的最高峰,最高值分别为:白骨壤41.4、红海榄40.3、木榄41.2、秋茄39.7、桐花树42.2、无瓣海桑40.3。

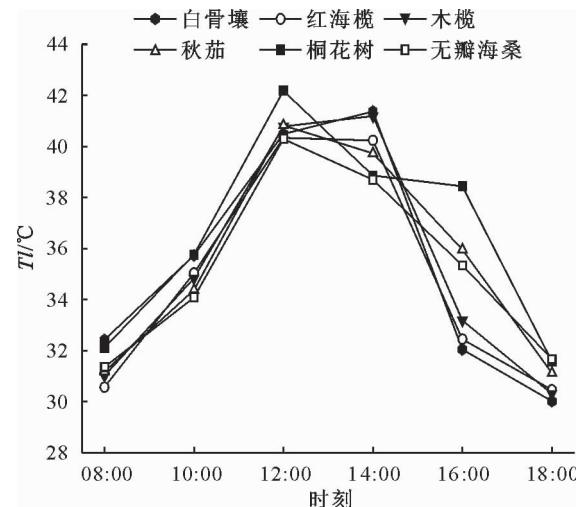


图5 叶面温度日变化

Fig. 5 Diurnal variation of T_l

3.6 叶面水气压亏缺的日变化

6种真红树植物的叶面水汽压亏缺08:00—12:00时均呈上升状态,12:00时后6种真红树植物的变化趋势出现差异(图6)。其中,木榄、白骨壤和红海榄的变化趋势趋近;无瓣海桑和秋茄的变化趋势相似。白骨壤12:00时后继续上升,上升幅度小于08:00—12:00时,14:00时后一直下降,14:00—16:00时的下降趋势大于16:00—18:00时。 Vpd 日均值从大到小依次为:无瓣海桑>秋茄>白骨壤>桐花树>木榄>红海榄(表2)。蒸腾速率日变化值差异不显著。

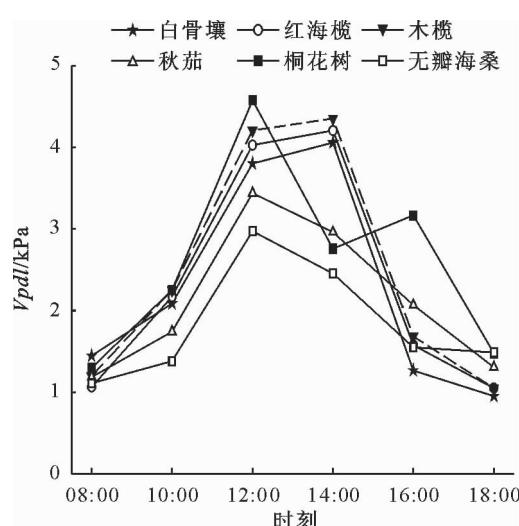


图6 叶面水气压亏缺日变化

Fig. 6 Diurnal variation of Vpd

3.7 光合有效辐射的日变化

08:00光合有效辐射低,6种真红树植物的净光合速率随有效光合辐射的增加而增加(图7),当达到一定值后开始下降,净光合速率也随之下降。无瓣海桑在光照为778 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, Pn 为

$9.82 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,之后随着光照强度增大,光合速率呈直线上升,当光照强度达到一定值后,随着光照强度的上升而下降,最后随着光照强度的下降而下降。

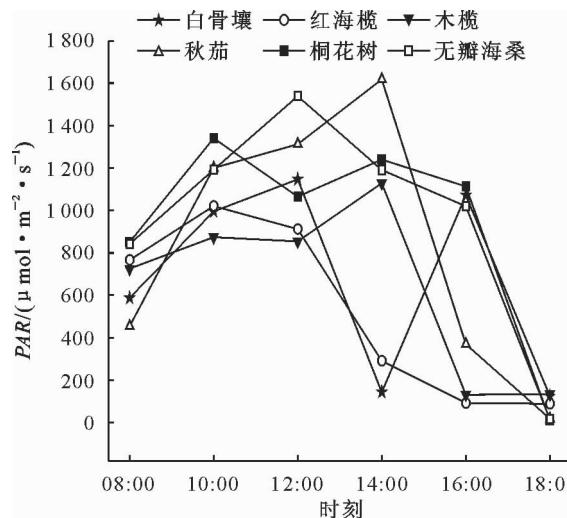


图 7 光合有效辐射

Fig. 7 Diurnal variation of PAR

3.8 气孔限制值的日变化

6种真红树植物的气孔限制值的日变化(图8)趋势不尽相同。无瓣海桑、白骨壤、木榄为单峰型。红海榄和秋茄表现为08:00—12:00上升,12:00—16:00下降,16:00后秋茄继续下降,红海榄则缓慢

上升。桐花树的气孔限制值日变化呈“双峰”趋势,两个峰值分别在10:00和16:00出现,16:00后的下降幅度最大。

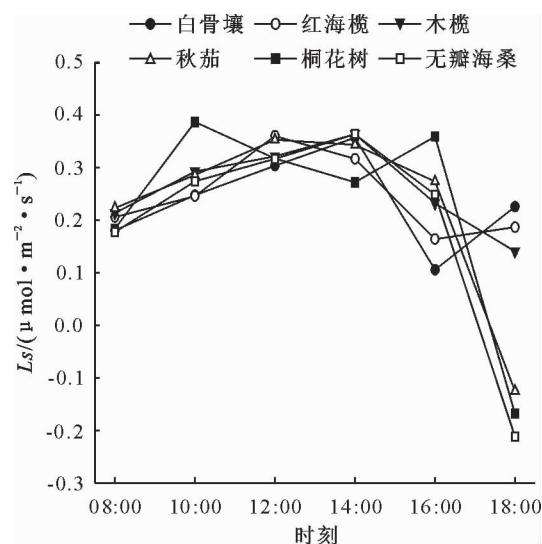


图 8 气孔限制值

Fig. 8 Diurnal variation of stomatal limitation value

3.9 净光合速率与相关生理生态因子的关系

3.9.1 简单相关分析 从表3可得,6种真红树植物的 P_n 值与 C_i 呈负相关关系,白骨壤和秋茄的 $p < 0.01$,为极显著性差异;无瓣海桑的 $p < 0.05$,为显著。 P_n 与 G_s 、 T_r 、 Vpd 、 PAR 、 T_l 均呈正相关关系。

表 3 净光合速率与各因子的关系

Table 3 The relationship of P_n and each factor

种类	G_s	C_i	T_r	Vpd	RAR	T_l
白骨壤(<i>A. marina</i>)	0.862 **	-0.596 **	0.845 **	0.043	0.741 **	0.305
红海榄(<i>R. stylosa</i>)	0.897 *	-0.152	0.685	0.963 **	0.124	0.180
木榄(<i>B. gymnorhiza</i>)	0.737	-0.228	0.388	0.391	0.019	0.061
秋茄(<i>K. candel</i>)	0.966 **	-0.997 **	0.865 *	0.791	0.727	0.802
桐花树(<i>A. corniculatum</i>)	0.715	-0.723	0.746	0.871 *	0.034	0.244
无瓣海桑(<i>R. stylosa</i>)	0.913 *	-0.964 *	0.844 *	0.925 **	0.396	0.666

注: * 和 ** 分别为 0.05 和 0.01 概率水平上的相关显著性。

3.9.2 逐步回归分析和偏相关分析 以 $G_s(X_1)$ 、 $C_i(X_2)$ 、 $T_r(X_3)$ 、 $Vpd(X_4)$ 、 $PAR(X_5)$ 、 $T_l(X_6)$ 与 $P_n(Y)$ 进行多元逐步分析,得最优回归方程。

$$\text{白骨壤: } Y = 4.419 + 0.07X_5 - 6.429X_4 + 0.813X_6 - 0.064X_2 + 0.668X_3 \quad (R=0.969^{**})$$

$$\text{红海榄: } Y = -8.035 + 32.787X_1 - 0.053X_2 - 3.503X_4 + 0.945X_6 \quad (R=0.963^{**})$$

$$\text{木榄: } Y = 13.528 + 40.28X_1 - 0.045X_2 \quad (R=0.938^{**})$$

$$\text{秋茄: } Y = 21.211 - 0.055X_2 + 18.951X_1 + 0.001X_5 \quad (R=0.975^{**})$$

$$\text{桐花树: } Y = 63.637 - 0.448X_1 - 0.053X_2 + 1.995X_3 + 1.770X_4 + 0.001X_5 - 1.461X_6 \quad (R=0.975^{**})$$

0.990 **)

$$\text{无瓣海桑: } Y = 27.368 - 0.067X_2 + 20.081X_1 \quad (R=0.985^{**})$$

6个回归方程经F检验、复相关系数检验和偏相关系数检验均达到极显著或者显著水平,表明该线性关系成立。从表4偏相关分析可以看出,白骨壤的净光合速率与胞间 CO_2 浓度和光合有效辐射相关关系最强,其中与胞间 CO_2 浓度是负相关关系;与光合有效辐射是正相关关系。红海榄的气孔导度和胞间 CO_2 浓度对净光合速率的影响最大,分别是正相关和负相关。木榄的气孔导度和胞间 CO_2 浓度与其净光合速率的相关性最强,气孔导度与净光合速率呈正相关关系,胞间 CO_2 浓度与净光合速

率呈负相关关系。秋茄的胞间 CO_2 浓度与其净光合速率的相关关系最强,为负相关。桐花树的胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率及叶面温度与其净光合速率的偏相关显著性水平都很高,偏相关系数最大的是胞间 CO_2 浓度。无瓣海桑的气孔导度和胞间 CO_2 浓度对其净光合速率的影响最大,分别为正相关关系和负相关关系。

表 4 净光合速率与影响因子的偏相关分析

Table 4 The partial correlation analysis of P_n and impact factor

植物种类		偏相关系数	显著性水平
白骨壤 (<i>Avicennia marina</i>)	$R(y, x_2)$	-0.825	0.000
	$R(y, x_3)$	0.407	0.003
	$R(y, x_4)$	-0.618	0.000
	$R(y, x_5)$	0.834	0.000
	$R(y, x_6)$	0.264	0.064
	$R(y, x_1)$	0.898	0.000
红海榄 (<i>R. stylosa</i>)	$R(y, x_2)$	-0.800	0.000
	$R(y, x_4)$	-0.528	0.000
	$R(y, x_6)$	0.461	0.000
	$R(y, x_1)$	0.998	0.044
木榄 (<i>B. gymnorhiza</i>)	$R(y, x_2)$	-0.968	0.161
	$R(y, x_1)$	0.448	0.001
	$R(y, x_2)$	-0.716	0.000
	$R(y, x_5)$	0.316	0.019
桐花树 (<i>Aegiceras corniculatum</i>)	$R(y, x_1)$	-0.015	0.914
	$R(y, x_2)$	-0.875	0.000
	$R(y, x_3)$	0.656	0.000
	$R(y, x_4)$	0.276	0.048
	$R(y, x_5)$	0.208	0.139
	$R(y, x_6)$	-0.507	0.000
无瓣海桑 (<i>R. stylosa</i>)	$R(y, x_1)$	0.827	0.000
	$R(y, x_2)$	-0.913	0.000

4 结论与讨论

午后强辐射使叶温升高和蒸腾失水加剧,刺激了气孔使气孔导度降低,避免了过量失水,但气孔关闭的同时使 CO_2 吸入量减少,体内营养物质的传输速度减慢,导致光合速率降低^[9]。随后,由于光照强度和气温的降低,真红树植物的净光合速率也逐渐下降,说明高光照强度、温度与 4 种真红树该时期的光合“午休”现象有显著的相关关系。高光强通过降低空气中湿度的大小和提高空气温度来间接地导致光合发生“午休”现象^[10]。蒸腾作用与光合作用有着一定的平行和依赖关系。气孔主要进行光合作用和蒸腾作用调节^[11];杨盛昌^[12]等研究表明,真红树植物通过叶片上的气孔微妙地调节着碳获取以及水分丢失这 2 个重要生理过程的平衡关系,且对外界的环境因子的变化作出相应反应,本文结果与此一致。

在光合作用正常进行的温度范围内(10~35℃),在光强、 CO_2 充足的情况下,温度越高,则

光合速率越高。所以,在光强度比较高时,可以适当将温度提高,从而光合效率会被提高^[13-14]。国外学者对佛罗里达 3 种真红树植物:大红树、亮叶白骨壤(*Avicennia germinans*)和假红树(*Laguncularia racemosa*)光合特性的研究也表明真红树植物叶片有 2 个特性:光合速率易变化和光合速率较低,认为叶温高于 35℃后,真红树植物光合速率被温度抑制^[15]。本试验中 10:00 时后气温高于 35℃,6 种真红树植物的光合速率均下降,与他们的研究相吻合。

本研究中,白骨壤、木榄、桐花树、无瓣海桑的 P_n 日变化呈“双峰”趋势,秋茄接近“双峰”。白骨壤、木榄 P_n 日变化的 2 个峰值分别在 10:00 和 16:00,桐花树、无瓣海桑 P_n 日变化的 2 个峰值分别在 10:00 和 14:00,4 者均出现“光合午休”现象,这可能是测定时在胞间 CO_2 浓度、叶面温度、气孔导度、蒸腾速率、光合有效辐射、大气蒸气压亏缺等特定生理因素有关,是它们综合作用的表现。

植物生长是对于生理因子综合作用的反映。本研究的生理因子中,光合有效辐射、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度与净光合速率的相关系数比较大,其中偏相关程度最大的是气孔导度和胞间 CO_2 浓度,说明气孔导度和蒸腾速率直接影响 6 种真红树植物叶片光合速率,从而间接影响其有机物质的合成与转化,对其光合能力起到直接的限制作用。因此,生理生态因子 $Ci(X_2)$ 、 $Tr(X_3)$ 、 $VpdL(X_4)$ 、 $PAR(X_5)$ 、 $Tl(X_6)$ 对白骨壤, $Gs(X_1)$ 、 $Ci(X_2)$ 、 $VpdL(X_4)$ 、 $Tl(X_6)$ 对红海榄, $Gs(X_1)$ 、 $Ci(X_2)$ 对木榄, $Gs(X_1)$ 、 $Ci(X_2)$ 、 $PAR(X_5)$ 对秋茄, $Gs(X_1)$ 、 $Ci(X_2)$ 、 $Tr(X_3)$ 、 $VpdL(X_4)$ 、 $Tl(X_6)$ 对桐花树, $Gs(X_1)$ 、 $Ci(X_2)$ 对无瓣海桑的净光合速率分别有重要影响。

参考文献:

- [1] 黄彦. 低碳经济时代下的森林碳汇问题研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(3): 260-268.
- [2] 肖复明, 张群, 范少辉. 中国森林生态系统碳平衡研究[J]. 世界林业研究, 2006, 19(1): 53-57.
- [3] 董延梅, 章银柯, 郭超, 等. 杭州西湖风景名胜区 10 种园林树种固碳释氧效益研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(4): 209-212.
- [4] DONG Y M, ZHANG Y K, GUO C, et al. Carbon fixation and oxygen release capabilities of 10 garden plants in the West Lake Scenic Area in Hangzhou[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(4): 209-212. (in Chinese)
- [5] 吴霞. 小陇山林区森林固碳效益的研究[J]. 西北林学院学报,

- 2008,23(5):164-167.
- WU X. Research on forest solid carbon benefit in Xiaolongshan forest region [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(5):164-167. (in Chinese)
- [5] 苏东凯,周永斌,唐庆华,等.不同杨树品种光合生理生态特性的研究[J].西北林学院学报,2006,21(2):39-41.
- SU D K, ZHOU Y B, TANG Q H, et al. Ecophysiological characteristics of photosynthesis in different poplar trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(2):39-41. (in Chinese)
- [6] 范杰英,郭军战,彭少兵.10个树种光合和蒸腾性能对水分胁迫的响应[J].西北林学院学报,2005,20(2):36-38,53.
- FAN J Y, GUO J Z, PENG S B. Photosynthesis and transpiration response of ten tree species to water stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(2):36-38,53. (in Chinese)
- [7] 夏尚光,张金池,梁淑英,等.南方岩榆光合作用日变化及其影响因子研究[J].亚热带植物科学,2007,36(3):8-11.
- XIA S G, ZHANG J C, LIANG S Y, et al. Research on photosynthetic daily course of *Ulmus crassifolia* and its influencing factors[J]. Subtropical Plant Science, 2007, 36(3): 8-11, 36. (in Chinese)
- [8] 甘德欣,王明群,龙岳林,等.3种彩叶植物的光合特性研究[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2006,32(6):607-610.
- GAN D X, WANG M Q, LONG Y L, et al. Photosynthetic characteristics of three kinds of colorful plants[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Science, 2006, 32(6): 607-610. (in Chinese)
- [9] 王冀龙,张硕新,雷瑞德,等.秦岭火地塘林区锐齿栎光合、蒸腾特性[J].西北林学院学报,2003,18(4):9-12.
- WANG Y L, ZHANG S X, LEI R D, et al. Characteristics of photosynthesis and transpiration of sharp-tooth oak in Huoditang forest zone of the Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2003, 18(4): 9-12. (in Chinese)
- [10] 王小兰,蔡靖,姜在民,等.不同水分条件下施肥对女贞光合及蒸腾作用的影响[J].西北林学院学报,2007,22(5):15-18.
- WANG X L, CAI J, JIANG Z M, et al. Effects of fertilization on photosynthesis and transpiration of *Ligustrum lucidum* under different water conditions [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(5):15-18. (in Chinese)
- [11] 刘建军,王得祥,雷瑞德,等.美国黄松、奥地利黑松和油松光合、蒸腾及生长特性分析[J].西北林学院学报,2002,17(3):1-4.
- LIU J J, WANG D X, LEI R D, et al. Photosynthesis, transpiration and growth features of *Pinus ponderosa*, *P. nigra* var. *austriaca* and *P. tabulaeformis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2002, 17(3):1-4. (in Chinese)
- [12] 杨盛昌,林鹏,李振基,等.夜间低温对红树幼苗光合特性的影响[J].厦门大学学报:自然科学版,1999,38(4):617-622.
- YANG S C, LIN P, LI Z J, et al. Effect of low night temperature on photosynthetic properties of mangrove seedlings[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 1999, 38(4): 617-622. (in Chinese)
- [13] 曹珂,王永熙,王力荣,等.遮荫对桃幼树光合特性的影响[J].西北林学院学报,2004,19(4):28-31.
- CAO K, WANG Y X, WANG L R, et al. Effects of shading on photosynthetic characteristics of young peach trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(4): 28-31. (in Chinese)
- [14] 张中峰,黄玉清,莫凌,等.岩溶区4种石山植物光合作用的光响应[J].西北林学院学报,2009,24(1):44-48.
- ZHANG Z F, HUANG Y Q, MO L, et al. Photosynthesis light response characteristics of four limestone plants in Karst area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(1):44-48. (in Chinese)
- [15] LOVELOCK C E, FELLER I C. Photosynthetic performance and resource utilization of two mangrove species coexisting in a hypersaline scrub forest[J]. Oecologia, 2003, 134(4): 455-462.

(上接第 27 页)

- [29] 王鹏程,肖文发,张守攻,等.三峡库区主要森林植被类型土壤渗透性能研究[J].水土保持学报,2007,21(6):51-55.
- WANG P C, XIAO W G, ZHANG S G, et al. Study on soil infiltration in some main vegetation types in three gorges reservoir area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(6):51-55. (in Chinese)
- [30] 孟广涛,方向京,柴勇,等.矿区植被恢复措施对土壤养分及物种多样性的影响[J].西北林学院学报,2011,26(3):12-16.
- MENG G T, FANG X J, CHAI Y, et al. Effect of vegetation restoration measures on soil nutrients and species diversity in abandoned area of Jinning Phosphorite Mine[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(03):12-16. (in Chinese)
- [31] DAVIS M R, CONDRON L M. Impact of grassland afforestation on soil carbon in New Zealand: a review of paired-site studies[J]. Australian Journal of Soil Research, 2002, 40(4): 675-690.
- [32] 曾永年,冯兆东,曹广超,等.黄河源区高寒草地土壤有机碳储量及分布特征[J].地理学报,2004,59(4):497-504.
- ZENG Y N, FENG Z D, CAO G C, et al. The soil organic carbon storage and its spatial distribution of alpine grassland in the source region of the Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4):497-504. (in Chinese)