网络出版时间:2025-11-26 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.05.010

3种蓼属植物对遮阴的光合生理响应及耐阴性评价

王黎,张鸽香
(南京林业大学 风景园林学院,江苏 南京 210037)

[摘 要] 【目的】探究遮阴处理对3种蓼属(*Polygonum*)植物生长及光合生理的影响,以筛选耐阴性较强的蓼属植物,为蓼属植物在园林中的开发应用提供理论依据。【方法】以头花蓼(*P. capitatum*)、火炭母(*P. chinense*)和香辣蓼(*P. odoratum*)为试验材料,采用盆栽试验,设置5个不同程度的遮阴(全光照(CK)和30%,50%,70%,90%遮阴)处理,测定不同处理植物的形态指标和光合指标,并通过主成分分析和隶属函数分析对3种植物的耐阴性进行综合评价。【结果】随着遮阴程度的增加,3种蓼属植物的叶面积和株高总体增大,茎粗总体减小;叶绿素含量上升,而叶绿素a/b下降;头花蓼的类胡萝卜素含量先上升后下降,火炭母和香辣蓼的类胡萝卜素含量总体增加。随着遮阴程度的增加,头花蓼中的光饱和点(LSP)先上升后下降,而火炭母和香辣蓼的LSP逐渐降低;3种蓼属植物的光补偿点(LCP)和暗呼吸速率(R_d)均降低,表观量子效率(AQY)和最大净光合速率($P_{n\,max}$)均先上升后下降。各遮阴处理3种蓼属植物的最大荧光(F_m)、PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m)、PSⅡ潜在活性(F_v/F_o)以及电子传递量子产额(φ_{Eo})均明显高于CK,初始荧光(F_o)和热耗散量子比率(φ_{Do})均低于CK。综合评价结果显示,3种植物的耐阴性排序为火炭母>香辣蓼>头花蓼。【结论】3种蓼属植物对弱光均有一定的适应能力,但适应能力的强弱具有一定差异,其中火炭母的耐阴性最强,头花蓼最弱。

[关键词] 蓼属植物;遮阴;光合特性;生长指标;耐阴性评价
[中图分类号] S681;Q945.11 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)05-0101-10

Photosynthetic physiological responses and shade tolerance evaluation of three *Polygonum* species to shading

WANG Li, ZHANG Gexiang
(*College of landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu* 210037, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study aims to investigate the effects of shading treatments on the growth and photosynthetic physiology of three *Polygonum* species, and screen for *Polygonum* species with strong shade tolerance, to provide a theoretical basis for their development and application in landscaping. 【Method】 Using *P. capitatum*, *P. chinense*, and *P. odoratum* as experimental materials, a pot experiment was conducted with five treatments (full sunlight as control (CK), 30%, 50%, 70%, 90% shading degree) to determine the morphological and photosynthetic indicators of the plants under different treatments. The negative Shade tolerance of the three plants was comprehensively evaluated through principal component analysis and membership function analysis. 【Result】 As shading degree increased, leaf area and plant height of the three *Polygonum* species generally increased, while stem diameter overall decreased. The chlorophyll content increased, but the chlorophyll a/b ratio decreased. The carotenoid content in *P. capitatum* first increased and then decreased, whereas it generally

[收稿日期] 2025-03-21 [修回日期] 2025-05-13
[基金项目] 南京市绿化园林局项目"南京地区野生花卉资源调查及引种栽培研究"(066018K60721);江苏高校品牌专业建设工程项目(PPZY2015.A063)
[作者简介] 王黎(2000—),女,江苏扬州人,在读硕士,主要从事园林植物生理与应用研究。E-mail:825118134@qq.com
[通信作者] 张鸽香(1967—),女,江苏高邮人,副教授,硕士生导师,主要从事园林植物生理与应用研究。E-mail:nld_zhang@njfu.com.cn

increased in *P. chinense* and *P. odoratum*. As shading degree increased, the light saturation point (LSP) of *P. capitatum* first rose and then fell, while the LSP of *P. chinense* and *P. odoratum* steadily declined. All three species showed reduced light compensation point (LCP) and dark respiration rate (R_d), whereas the apparent quantum yield (AQY) and maximum net photosynthetic rate ($P_{n\,max}$) first increased before decreasing. Under various shading treatments, the maximum fluorescence (Fm), PSⅡ maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), PSⅡ potential activity (F_v/F_o), and electron transport quantum yield (φ_{Eo}) of the three *Polygonum* species were significantly higher than those of the control (CK), while the initial fluorescence (F_o) and heat dissipation quantum ratio (φ_{Do}) were lower than those of CK. Comprehensive evaluation ranked shade tolerance of the three species as: *P. chinense*>*P. odoratum*>*P. capitatum*.【Conclusion】All three *Polygonum* species exhibit low light adaptability, but the extent of this adaptability differs among them. *P. chinense* demonstrates the strongest shade tolerance, while *P. capitatum* exhibits the weakest.

Key words: *Polygonum*; shading; photosynthetic characteristics; growth indicators; shade tolerance evaluation

光是影响植物生长发育的重要因子,不仅为植物提供光合作用所需的能量,还对植物的生长发育有重要的调控作用[1]。遮阴会改变植物的生长环境,影响植物的光合生理特征,从而影响植物的代谢与发育[2-3]。叶片是植物暴露在环境中最大的器官,对光的敏感度高,在不同光照强度下,叶片的光合特性和组织结构等均会随之发生变化[4],在光照不足的情况下,植物可能会出现叶片萎蔫、发育期变短、光合作用减弱等现象,从而影响城市绿地景观的观赏效果进而影响城市形象,因此研究遮阴对植物光合生理影响及并对植物耐阴性进行评价有重要意义。

蓼属(*Polygonum*)植物多为一年至多年生草本,在世界范围内分布广泛,常成片生于林缘、水沟边和山谷湿地,形成优美的自然景观,有极大的园林应用潜力,同时该类植物也是我国重要的药物资源[5],具有较高的药用价值。目前,有关蓼属植物的研究多集中在植物资源调查[6]、药用价值[7]、食用价值以及耐水淹[8]和耐重金属[9]等方面,对其耐阴性方面的研究相对较少,不利于其在城市园林绿化中的引种与应用。鉴于此,本研究以野外移植的头花蓼(*P. capitatum*)、火炭母(*P. chinense*)和香辣蓼(*P. odoratum*)为对象,分析遮阴对植物形态指标、叶绿素含量、光合响应参数以及叶绿素荧光特性的影响,并运用主成分分析和隶属函数分析法对3种蓼属植物耐阴性进行评价,以筛选耐阴性较优的蓼属植物,为其在国内的应用与推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地位于南京林业大学国家园林实验教学示范中心(118°49′E,32°05′N),该区属于北亚热带季风气候,四季分明,夏季高温多雨,冬季低温少雨,年平均气温达16 ℃,冬季极端最低气温−7.9 ℃,年平均降水量1 034 mm。2024年3月初,将头花蓼、火炭母和香辣蓼植株栽至塑料花盆(高11.5 cm,上口径13 cm,下口径11.5 cm),每盆栽植1棵,种植土壤为原生土壤与富含养分的轻质营养土以2∶1体积比混合而成,之后放置于南京林业大学国家级园林实验教学示范中心室外空地进行缓苗,自然生长至成熟苗(孕蕾期至花期),生长期间保持水肥一致。

1.2 试验设计

试验于2024年5月1日开始,选用不同透光率的遮阴网搭设人工遮阴棚,规格为3 m×1.5 m×1.5 m(长×宽×高),棚间距5 m,通过铺设不同层数的遮阴网进行遮阴处理,并测定不同处理的光照强度。本试验共设置5个遮阴处理,分别为全光照(对照组,CK,光照强度1 881 μmol/(m²·s))、30%遮阴程度(T1,光照强度1 321 μmol/(m²·s))、50%遮阴程度(T2,光照强度943 μmol/(m²·s))、70%遮阴程度(T3,光照强度564 μmol/(m²·s))和90%遮阴程度(T4,光照强度188 μmol/(m²·s)),每个处理设置3个重复。本研究采用盆栽试验,进行完全随机区组设置,每个重复15盆,3种植物共计675盆,试验期间每天上午对每个处理组进行浇水处理,使每盆土壤相对含水量基本饱和,同时清除杂草,保证植物正常生长,遮阴时间为50 d(预试验结果)。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 形态指标 遮阴处理50 d后,分别用卷尺和游标卡尺测定植株的株高和茎粗,使用蒸馏水将叶片清洗干净,吸水纸擦净多余水分后,用AM-300

手持叶面积仪扫描叶片测定叶面积。

1.3.2　光合色素含量　遮阴处理50 d后，从各处理中随机选取生长良好的3株幼苗，选取植株主枝从上到下第3～5片生长状态一致且健康完整的叶片，参照李合生[10]的方法测定叶绿素a和b以及类胡萝卜素含量，计算叶绿素总含量（叶绿素a与b含量之和）以及叶绿素a/b。

1.3.3　光响应参数　遮阴50 d时，选择晴天上午09:00－11:00，采用美国PP-system的CIRAS-3型便携式光合仪测定光合-响应参数，每处理选择3株长势一致的植株，选择中上部健康成熟、朝向一致的3片叶进行测定。测定环境的CO_2浓度为400 μmol/mol，空气相对湿度为75%，叶室温度控制在25 ℃，通过控制红蓝光LED光源，设置不同的光合有效辐射（PAR）梯度（1 800，1 600，1 400，1 200，1 000，800，600，400，200，100，50，25，0 μmol/(m^2·s)），测定不同PAR下植物的净光合速率（net photosynthetic rate，P_n），利用文献[11]的双曲线修正模型拟合各遮阴处理下3种植物的光响应曲线，计算最大净光合速率（$P_{n\,max}$）、光饱和点（LSP）、光补偿点（LCP）、表观量子效率（AQY）和暗呼吸速率（R_d），每个指标测量3次，结果取平均值。

1.3.4　叶绿素荧光参数及能量分配比率　选择晴天上午09:00－11:00，使用HandyPEA（英国Hansatech Instruments公司）测定叶片叶绿素荧光参数，选取的叶片标准同1.3.2，在检测开始前，确保避开叶脉并夹住叶片，在暗适应20 min后移开叶夹，记录初始荧光（F_o）、最大荧光（F_m）、最大化学效率（F_v/F_m）、PSⅡ潜在活性（F_v/F_o）以及电子传递量子产额（φ_{Eo}）和热耗散量子比率（φ_{Do}）。

1.4　数据处理

为确保综合评价的可靠性，首先将所有指标的原始数据进行无量纲化处理，即参照文献[10]的方法计算所有指标的耐阴系数（α），耐阴系数（α）＝遮阴处理测定值/CK处理测定值；然后进行主成分分析[10]；最后运用隶属函数分析[10]计算隶属函数值（μ）及综合评价值（D）。

利用SPSS 23和Excel 2010软件进行数据分析，利用Excel 2010和Origin 8做图，运用光合计算软件4.1.1中的双曲线修正模型辅助拟合光响应曲线，运用PEAPlus软件解析叶绿素荧光参数。采用单因素（ANOVA）和Duncan's法进行方差分析和多重比较（$P<0.05$）。

2　结果与分析

2.1　不同遮阴处理对3种蓼属植物生长指标的影响

由表1可知，随着遮阴程度的增加，头花蓼、火炭母和香辣蓼的叶面积和株高均高于CK，且T3和T4处理明显高于其他处理，与CK总体显著差异。此外，头花蓼、火炭母和香辣蓼3种植物的茎粗随着遮阴程度的增加总体呈下降的趋势，总体均以T4处理最小，分别较CK显著下降43.40%，54.55%，37.04%。

表1　在不同遮阴处理下3种蓼属植物的形态指标

Table 1　Morphological indexes of three *Polygonum* species under different shade treatments

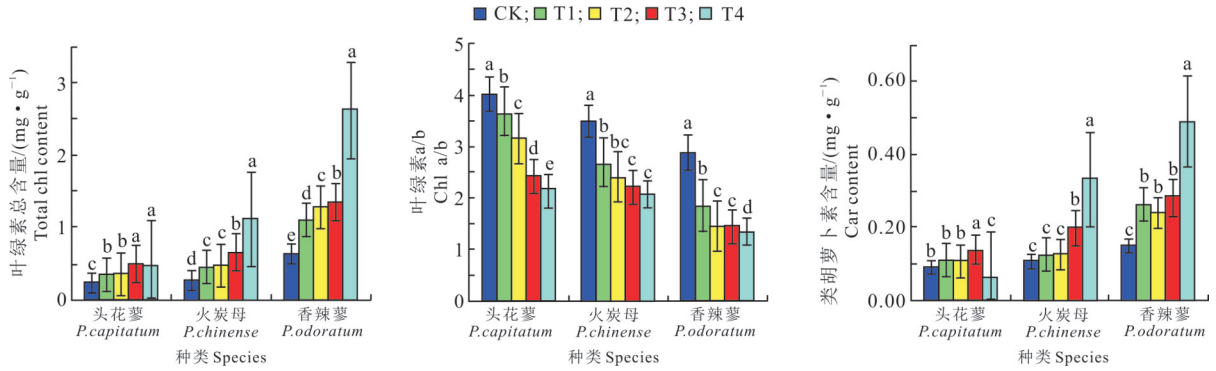
种类 Species	处理 Treatment	叶面积/cm^2 Leaf area	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem diameter
头花蓼 *P. capitatum*	CK	4.52±0.63 c	13.36±1.88 b	0.18±0.01 a
	T1	5.79±0.59 bc	11.91±1.58 c	0.11±0.01 b
	T2	5.85±0.66 bc	10.27±1.02 c	0.11±0.01 b
	T3	6.57±1.37 ab	17.33±0.58 a	0.10±0.01 b
	T4	7.92±0.68 a	13.00±0.01 b	0.10±0.01 b
火炭母 *P. chinense*	CK	39.81±0.58 c	27.46±3.01 c	0.40±0.02 a
	T1	40.01±1.19 c	34.88±4.72 b	0.35±0.04 b
	T2	43.01±1.49 b	42.17±5.05 a	0.32±0.01 b
	T3	44.00±0.80 b	47.30±0.85 a	0.21±0.02 c
	T4	52.54±1.66 a	48.37±1.31 a	0.18±0.02 c
香辣蓼 *P. odoratum*	CK	10.52±0.36 d	29.87±4.57 b	0.36±0.03 b
	T1	16.17±0.12 c	30.90±0.36 ab	0.30±0.01 b
	T2	18.35±0.41 b	31.57±4.47 ab	0.29±0.02 b
	T3	19.83±0.27 a	35.53±0.50 ab	0.27±0.01 b
	T4	18.31±0.24 b	36.67±2.89 a	0.23±0.02 a

注：CK、T1、T2、T3、T4分别为全光照和30%，50%，70%，90%遮阴处理。同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note: CK, T1, T2, T3, and T4 represent full sunlight, 30%, 50%, 70%, and 90% shade treatments, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2 不同遮阴处理对3种蓼属植物叶片光合色素含量的影响

由图1可知,随着遮阴程度的增加,3种蓼属植物的叶绿素总含量均高于CK,其中头花蓼以T3处理最大,火炭母和香辣蓼则以T4处理最大,且各遮阴处理均与CK显著差异。3种植物的叶绿素a/b随遮阴程度的增加而下降,并且各遮阴处理组均与CK差异显著。随着遮阴程度的增加,头花蓼的类胡萝卜素含量先上升后下降,以T3处理最大;而火炭母和香辣蓼的类胡萝卜素含量大致呈上升趋势,均以T4处理最大,分别较CK显著上升209.17%和221.82%。



图柱上标不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)

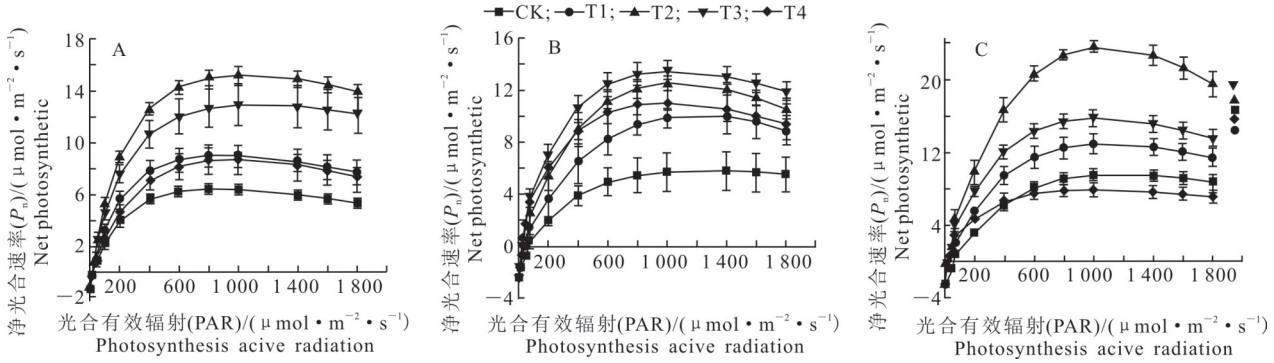
Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments($P<0.05$).

图1 不同遮阴处理下3种蓼属植物叶片光合色素含量

Fig. 1 Photosynthetic pigment content in leaves of three *Polygonum* species under different shade treatments

2.3 不同遮阴处理对3种蓼属植物叶片光合响应参数的影响

由图2可知,3种蓼属植物的光响应曲线均呈“抛物线形”,其趋势大致可分为3个阶段:当PAR为0~400 μmol/(m²·s)时,4种植物的P_n随PAR增加快速升高;当PAR为400 μmol/(m²·s)至光饱和点时,P_n上升速率变缓慢;当PAR超过光饱和点后,P_n变化趋势平缓,总体呈下降趋势。



A. 头花蓼;B. 火炭母;C. 香辣蓼。

A. *P. capitatum*; B. *P. chinense*; C. *P. odoratum*.

图2 不同遮阴处理对3种蓼属植物光响应曲线的影响

Fig. 2 Effects of shade treatments on photosynthetic light-response curves of three *Polygonum* species

由表2可知,随着遮阴程度的增加,3种蓼属植物的表观量子效率(AQY)先上升后下降,其中头花蓼和香辣蓼的AQY以T2处理最大,火炭母的AQY以T3处理最大。3种蓼属植物的最大净光合速率($P_{n\,max}$)都呈现先上升后下降的趋势,但变化规律有差异,其中头花蓼和香辣蓼均以T2处理最大,分别较CK显著上升136.28%,145.28%;而火炭母则以T3处理最大。

由表2还可知,随着遮阴程度的增加,头花蓼的光饱和点(LSP)先上升后下降,各遮阴处理LSP均高于CK,说明全光照环境对头花蓼的光合结构造成了一定的损伤,强光对头花蓼生长产生了抑制。随着遮阴程度的增加,头花蓼的光补偿点(LCP)总体下降,各遮阴处理与CK差异显著;火炭母和香辣蓼的LSP和LCP均呈逐渐下降的趋势。此外,随着遮阴程度的增加,3种蓼属植物的暗呼吸速率(R_d)

均逐渐下降，均以T4处理最小。

表2　不同遮阴处理对3种蓼属植物光合响应参数的影响

Table 2　Effects of shade treatments on photosynthetic light-response parameters of three *Polygonum* species

种类 Species	处理 Treatment	表观量子效率(AQY)/(mol·mol^{-1}) Apparent quantum efficiency	最大净光合速率($P_{n\,max}$)/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Max net photosynthetic rate	光饱和点(LSP)/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Light saturation point	光补偿点(LCP)/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Light compensation point	暗呼吸速率(R_d)/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Dark respiration rate
头花蓼 *P. capitatum*	CK	0.055±0.0070 c	6.44±0.32 d	848.42±45.61 d	29.25±6.25 a	1.37±0.12 a
	T1	0.066±0.006 0 bc	9.04±0.85 c	895.58±64.41 cd	21.24±2.68 b	1.27±0.06 a
	T2	0.089±0.008 6 a	15.22±0.67 a	1 037.15±19.73 ab	13.59±2.65 c	1.16±0.28 a
	T3	0.076±0.005 9 ab	12.94±1.58 b	1 120.33±39.29 a	10.07±0.43 c	0.74±0.08 b
	T4	0.035±0.001 7 d	7.71±0.36 cd	977.86±71.02 bc	10.41±1.95 c	0.35±0.05 c
火炭母 *P. chinense*	CK	0.033±0.001 5 b	5.89±1.49 c	1 299.41±166.60 a	78.91±6.72 a	2.12±0.21 a
	T1	0.035±0.002 9 b	10.30±0.56 b	1 213.90±120.93 ab	69.05±21.14 a	1.96±0.12 a
	T2	0.049±0.003 1 ab	12.60±0.52 ab	1 055.00±52.56 bc	34.29±7.36 b	1.50±0.22 b
	T3	0.066±0.000 3 a	13.49±0.86 a	1 029.70±36.35 bc	21.69±5.12 b	1.32±0.24 b
	T4	0.052±0.003 3 ab	11.09±1.96 ab	967.27±53.36 b	11.94±1.43 b	0.59±0.02 c
香辣蓼 *P. odoratum*	CK	0.041±0.007 2 c	9.67±0.48 d	1 196.77±66.49 a	76.03±9.88 a	2.69±0.33 a
	T1	0.058±0.008 4 bc	13.04±1.15 c	1 135.49±145.96 a	47.08±3.06 b	2.47±0.47 ab
	T2	0.077±0.013 5 bc	23.73±0.63 a	1 070.62±101.29 a	26.84±7.21 c	1.93±0.29 b
	T3	0.064±0.003 2 ab	15.78±0.90 b	1 029.43±26.26 a	19.31±0.99 cd	1.20±0.12 c
	T4	0.047±0.003 4 bc	7.91±0.73 d	985.30±41.47 a	11.27±2.72 d	0.50±0.09 d

2.4　不同遮阴处理对3种蓼属植物叶片叶绿素荧光参数和能量分配比率的影响

2.4.1　叶绿素荧光参数的变化　由表3可知，3种蓼属植物的初始荧光(F_o)具有相同的变化趋势，均随着遮阴程度的增加呈先下降后上升的趋势，头花蓼和香辣蓼均以T2处理最小，火炭母以T3处理最小。随着遮阴程度的增加，3种植物的最大荧光(F_m)、PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m)和潜在活性(F_v/F_o)均高于CK，且差异总体达显著水平。

表3　不同遮阴处理对3种蓼属植物叶绿素荧光参数的影响

Table 3　Effects of shade treatments on chlorophyll fluorescence parameters of three *Polygonum* species

种类 Species	处理 Treatment	初始荧光(F_o) Original fluorescence	最大荧光(F_m) Maximal fluorescence	PSⅡ最大化学效率(F_v/F_m) PSⅡ maximal photochemical efficiency	PSⅡ潜在活性(F_v/F_o) PSⅡ potential activity
头花蓼 *P. capitatum*	CK	575.67±23.80 a	2 110.33±150.39 c	0.726±0.017 d	2.67±0.24 d
	T1	551.33±7.13 ab	2 269.67±138.35 bc	0.756±0.014 c	3.12±0.23 cd
	T2	483.67±3.86 c	2 580.33±130.55 a	0.812±0.009 a	4.33±0.25 a
	T3	528.67±14.82 b	2 450.33±80.83 ab	0.784±0.005 b	3.64±0.11 b
	T4	560.00±15.25 ab	2 478.67±88.91 ab	0.774±0.009 bc	3.43±0.19 bc
火炭母 *P. chinense*	CK	630.00±49.04 a	1 875.67±51.69 c	0.664±0.003 d	1.99±0.23 d
	T1	617.33±62.74 a	2 491.00±49.44 b	0.753±0.020 c	3.07±0.33 c
	T2	547.67±19.60 ab	2 700.33±80.64 b	0.797±0.006 b	3.93±0.15 b
	T3	464.67±33.33 b	2 953.67±155.49 a	0.843±0.005 a	5.37±0.22 a
	T4	550.00±29.81 ab	2 671.33±152.59 b	0.793±0.023 bc	3.89±0.55 b
香辣蓼 *P. odoratum*	CK	551.33±23.98 a	2 401.67±97.58 b	0.770±0.011 c	3.36±0.22 c
	T1	416.00±33.03 b	2 604.67±25.63 a	0.840±0.013 a	5.30±0.49 a
	T2	380.33±10.53 b	2 620.67±127.24 a	0.855±0.003 a	5.89±0.17 a
	T3	508.67±36.00 a	2 682.67±86.19 a	0.810±0.013 b	4.30±0.38 b
	T4	525.00±16.27 a	2 688.00±67.19 a	0.804±0.011 b	4.13±0.29 b

2.4.2　能量分配比率　不同遮阴处理下3种蓼属植物的能量分配比率的变化如图4所示。图4显

示,随着遮阴程度的增加,3种蓼属植物的φ_{Eo}均高于CK。头花蓼的φ_{Eo}呈现“升—降—升”的趋势,在T4处理达到最大值,其中T1处理与CK差异不显著,T2、T3和T4处理分别较CK显著上升18.81%,17.76%,24.85%;火炭母φ_{Eo}先上升后下降,在T3处理下达到最大值,但是各处理间均无显著差异;香辣蓼的φ_{Eo}逐渐上升,在T4处理下达到最大值,T1、T2处理与CK无显著差异,T3、T4处理分别较CK显著上升了10.06%,20.67%。

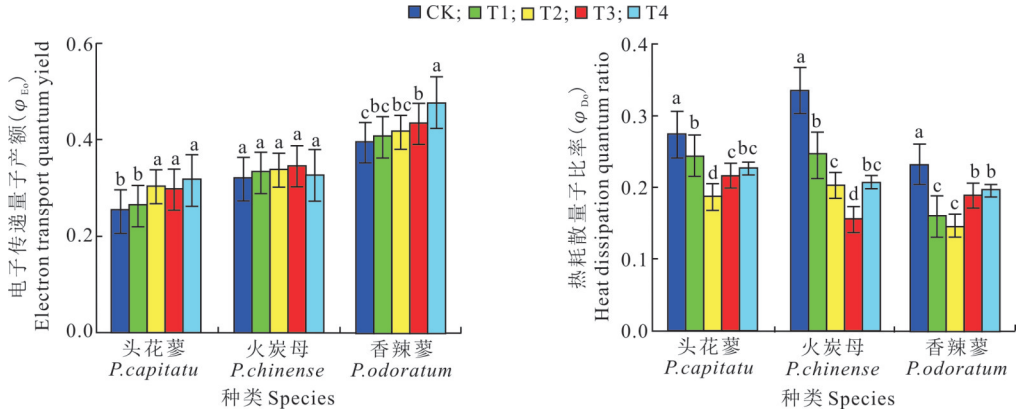


图3 不同遮阴处理对3种蓼属植物能量分配比率的影响

Fig. 3 Effects of shade treatments on the energy allocation ratios of three *Polygonum* species

图4还显示,随着遮阴程度的增加,3种蓼属植物的φ_{Do}均先下降后上升,其中头花蓼和香辣蓼在T2处理下达到最小值,火炭母在T3处理下达到最小值。T1、T2、T3和T4处理头花蓼、火炭母和香辣蓼较CK分别显著下降10.96%,31.37%,21.16%,17.39%;26.37%,39.63%,53.21%,38.35%和30.49%,36.78%,17.47%,14.90%。

2.5 3种蓼属植物耐阴性综合评价

2.5.1 *主成分分析* 为评价3种蓼属植物的耐阴性,得出各遮阴处理17项指标的耐阴系数(α)值,并且对其进行主成分分析,可以将其分为4个主成分(表4),其累计方差贡献率达89.18%。主成分1的方差贡献率为38.61%,其中株高、AQY、$P_{n\,max}$、F_m、F_v/F_m、F_v/F_o的影响较大;主成分2的方差贡献率为27.71%,其中chl a/b、LCP、R_d的影响较大;主成分3方差贡献率为12.46%,其中茎粗的影响较大,主成分4方差贡献率为10.41%,其中F_o的影响较大。

2.5.2 *隶属函数分析* 根据主成分分析结果再进行隶属函数分析,可以计算出3种蓼属植物的隶属函数值(μ)和综合评价值(D),并且根据D值对3种植物的耐阴性进行排序,D值越大表示植物耐阴性较优,结果见表5。由表5可见,3种植物对不同遮阴处理均有不同的响应,3种蓼属植物的耐阴性排序为火炭母(0.587)>香辣蓼(0.378)>头花蓼(0.360),可知火炭母耐阴性最优。

表4 不同遮阴处理下3种植物形态和光合指标的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of morphological and photosynthetic indicators of three *Polygonum* species under different shade treatments.

指标 Indicator	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3	主成分4 Principal component 4
株高 Plant height	0.700	−0.480	0.220	0.364
茎粗 Stem diameter	0.268	0.168	0.800	−0.075
叶面积 Leaf area	−0.612	−0.424	−0.037	−0.584
叶绿素总量 Total Chl content	−0.052	−0.926	0.164	0.095
叶绿素 a/b Chl a/b	0.010	0.865	0.213	−0.122
类胡萝卜素 Car	0.171	−0.724	0.407	−0.243
表观量子效率(AQY) Apparent quantum efficiency	0.723	0.046	−0.114	−0.607
最大净光合速率($P_{n\,max}$) Max net photosynthetic rate	0.743	0.322	−0.350	−0.145
光饱和点(*LSP*) Light saturation point	−0.556	0.401	−0.598	0.085
光补偿点(*LCP*) Light compensation point	−0.138	0.890	0.224	0.295

表4（续）　Table 4(continued)

指标 Indicator	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3	主成分4 Principal component 4
暗呼吸速率(R_d) Dark respiration rate	0.214	0.949	0.085	−0.078
初始荧光(F_o) Original fluorescence	−0.632	−0.102	0.194	0.672
最大荧光(F_m) Maximal fluorescence	0.829	−0.173	−0.246	0.423
PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m) PSⅡ maximal photochemical efficiency	0.943	−0.066	−0.133	0.266
PSⅡ潜在活性(F_v/F_o) PSⅡ potential activity	0.960	−0.079	−0.205	0.057
电子传递量子产额(φ_{Eo}) Electron transport quantum yield	−0.577	−0.363	−0.671	0.081
热耗散量子比率(φ_{Do}) Heat dissipation quantum ratio	−0.957	0.025	0.179	0.081
权重 Weight	0.386	0.277	0.125	0.104
方差贡献率/% Variance contribution rate	38.61	27.71	12.46	10.41
累计方差贡献率/% Cumulative contribution rate	38.61	66.32	78.77	89.18

表5　3种蓼属植物耐阴性的隶属函数分析

Table 5　Membership function analysis of shade tolerance of three *Polygonum* species

植物种类 Species	处理 Treatment	隶属函数值 Subordinate function value				综合评价值(D) Comprehensive evaluation value	平均值 Average	排序 Ranking
		$\mu(1)$	$\mu(2)$	$\mu(3)$	$\mu(4)$			
头花蓼 *P. capitatum*	T1	0.139	1.000	0.792	0.626	0.495	0.360	3
	T2	0.372	0.869	0.000	0.437	0.430		
	T3	0.242	0.534	0.110	0.625	0.320		
	T4	0.000	0.346	0.113	0.805	0.194		
火炭母 *P. chinense*	T1	0.444	0.921	0.964	1.000	0.651	0.587	1
	T2	0.713	0.668	0.695	0.766	0.627		
	T3	1.000	0.422	0.053	0.653	0.577		
	T4	0.701	0.111	1.000	0.636	0.492		
香辣蓼 *P. odoratum*	T1	0.391	0.792	0.892	0.305	0.513	0.378	2
	T2	0.553	0.670	0.565	0.000	0.470		
	T3	0.241	0.407	0.758	0.336	0.335		
	T4	0.109	0.000	0.767	0.533	0.193		

3　讨　论

3.1　遮阴对3种蓼属植物形态特征的影响

植物的形态特征变化能直观地反映植物的生长状况。研究表明，弱光下的植株较高，叶面积较大[12]，在本研究中，随着遮阴程度的增加，3种蓼属植物的株高和叶面积均逐渐上升或先上升后下降，但均高于CK，说明3种蓼属植物都能在光照强度降低的时候通过增加株高和扩大叶面积来获得更多的光能。

本研究中，3种蓼属植物的茎粗随遮阴程度的增加总体降低，茎秆变得细软，这与前人对东北铁线莲（*Clematrs mandshusica*）的研究结果相似[13]，说明在轻度遮阴环境下3种蓼属植物将生物量优先分配给茎，使其同化器官更发达，从而捕获更多光能；但随着遮阴程度的增加，光合作用产物不足，茎秆细胞得不到足够的营养物质，导致其变得细软，这是植物对荫蔽环境的适应性反应。

3.2　遮阴对3种蓼属植物叶片光合色素含量的影响

本研究中，随着遮阴程度的增加，火炭母和香辣蓼的叶绿素和类胡萝卜素含量总体呈上升的趋势，头花蓼的以上指标则先上升后下降，说明3种植物对弱光的利用能力都较强；而在强光下，植物未能有效消耗过量的光能，从而产生了光抑制现象。

叶绿素a/b可以反映植物适应外界环境的能力，其值越小，说明该植物利用环境中的有限光能进行光合作用的能力越强，耐阴性越好[14]。本研究中，随着遮阴程度的增加，3种蓼属植物的叶绿素a/b值均下降，说明叶绿素b含量随着光照强度的减弱逐渐升高，叶绿素a含量则减小，这与江新凤等[15]对茶树（*Camellia sinensis*）和曹良军等[16]对麦冬（*Ophiopogon japonicus*）的研究结果相一致。

3.3 遮阴对3种蓼属植物光响应参数的影响

表观量子效率(AQY)是反映植物光合作用中光能转化效率的一个重要指标,其值越大说明植物利用弱光的能力越强[17]。本研究中,3种蓼属植物的AQY均随遮阴程度的增加呈先上升后下降趋势,说明在适度遮阴的环境下3种蓼属植物植物对遮阴具有一定的适应性,能通过增加光量子效率来抵抗外界逆境胁迫。最大净光合速率($P_{n\,max}$)表示植物的最大光合潜力。姜瑞芳等[18]发现,在遮阴环境下珙桐(*Davidia involucrate*)的$P_{n\,max}$大于自然光处理。本试验中,3种蓼属植物的$P_{n\,max}$均先上升后下降,并且各遮阴处理的$P_{n\,max}$均高于CK,说明遮阴提高了叶片的光能利用效率,这与前人的研究结果一致。

光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)均能反映植株对光的利用能力[19]。研究表明,在遮阴环境中植物LSP都小于全光照环境[20-21]。本试验中,火炭母和香辣蓼LSP均随着遮阴程度的增加而下降,与前人研究结论一致;但是本试验中头花蓼的LSP随着遮阴程度的上升而先升后降,并且LSP均大于CK,推测可能是强光照射使得植株无法将多余的光能完全转化为热能耗散掉,导致光合结构受到一定程度的破坏而出现光抑制现象。本研究中,3种蓼属植物的LCP和暗呼吸速率(R_d)均随着遮阴程度增加逐渐降低,说明在遮阴环境中,3种蓼属植物能够通过减小LCP和R_d来适应弱光环境,减少干物质的消耗,从而促进有机物的积累来满足自身的生长需求,与前人在堇叶紫金牛(*Ardisia violacea*)[22]和丰香草莓(*Fragaria ananassa*)[23]中的研究结果一致。

3.4 遮阴对3种蓼属植物叶绿素荧光参数和能量分配比率的影响

叶绿素荧光参数可以体现环境条件对植物光合结构的影响程度。初始荧光(F_o)的变化可以推测光反应中心的状态以及保护机制,逆境条件下,F_o的增加表明植物类囊体膜受到损害,PSⅡ反应中心失活或被破坏[24]。本研究中,随着遮阴程度的增加,3种蓼属植物的F_o均先下降后上升,且各遮阴处理的F_o均低于CK,说明过度遮阴处理使植物PSⅡ反应中心受到了不可逆的破坏或可逆失活。本试验中,适度遮阴使得3种蓼属植物的最大荧光(F_m)逐渐上升,说明在适度遮阴的环境下,植物的PSⅡ反应中心能有效地吸收和转换光能,并将光能有效地转化为化学能,进而导致F_m值上升,与前人对青牛胆(*Tinospora sagittata*)[25]的研究结果一致。F_v/F_m反映了PSⅡ反应中心的光能转换效率。本研究中,3种蓼属植物的F_v/F_m均随着遮阴程度的增加呈先上升后下降的趋势,并且均高于CK,说明在强光下3种植物的生长受到了胁迫,在轻度遮阴下具有较高的光能转化效率和耐受性。F_v/F_o被用来衡量PSⅡ潜在光化学活性。在本研究中,3种蓼属植物F_v/F_o与F_v/F_m变化趋势一致,说明在适度的遮阴环境下,3种蓼属植物会通过提高F_v/F_o和F_v/F_m将捕获的光能以更高的速度和效率转化为化学能,从而改善叶片的光合功能[26]。

φ_{Eo}和φ_{Do}反映了PSⅡ反应中心的能量分配状况[27]。本研究中,与CK相比,3种蓼属植物的φ_{Eo}在遮阴环境下明显升高,说明植物会启动自身的保护调节机制,增加电子传递,吸收光能,减少植物热耗散损失的能量,从而满足植物自身的生长[28]。这与贾浩等[29]在"保佳红"桃树(*Prunus persica*)中的研究结果一致。

3.5 3种蓼属植物的耐阴性综合评价

植物的耐阴性是一个复杂的生理反应,不同指标对遮阴处理的反应都有差异,因此仅通过单一指标的分析具有局限性[28]。本研究通过主成分分析和隶属函数分析将不同遮阴处理下3种蓼属植物的各指标转换成4个主要成分,其累计方差贡献率高达89.18%,能反映绝大部分指标信息。在此基础上,本研究对3种蓼属植物的耐阴能力进行了综合评价,发现适度遮阴有利于其生长,3种蓼属植物的耐阴性大小顺序为火炭母>香辣蓼>头花蓼。

4 结 论

与CK相比,不同遮阴处理对3种蓼属植物形态特征、光合色素、光响应参数、叶绿素荧光参数和能量分配比率有明显影响。综合评价结果显示,火炭母的耐阴性最强,利用散射光生长,可以栽培在大型乔木的树荫下、建筑背阴处或者光线较弱的商业用地;头花蓼的耐阴性相对较弱,在进行园林栽培时尽量选择具有一定光线的场地。因此,应科学地考虑3种蓼属植物对遮阴环境的光合生理响应,从而最大化实现其园林价值。

[参考文献]

[1] 顾雪丹,吕东,赵祜,等. 遮阴对红砂幼苗生长及光合特性的影响[J]. 干旱区资源与环境,2023,37(8):145-152.
GU X D,LÜ D,ZHAO H,et al. Influence of shading on growth

and photosynthetic characteristics of *Reaumuria soongorica* seedlings[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(8):145-152.

[2] 刘颖娇，李国防，王志博，等. 中午适度遮阴对苹果叶片光合特性的影响[J]. 西北农业学报，2015,24(2):91-96.
LIU Y J, LI G F, WANG Z B, et al. Effect of moderately shade on photosynthetic characteristic in *Malus domestica* Borkh. leaves duing middy[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2015,24(2):91-96.

[3] 刘益宏，严慧丽，聂江力，等. 遮阴处理对知母光合特性的影响[J]. 天津农林科技，2024,2(1):1-5.
LIU Y H, YAN H L, NIE J L, et al. Effects of shading treatment on photosynthetic characteristics of *Anemarrhena asphodeloides*[J]. Tianjin Agricultural and Forestry Science and Technology, 2024,2(1):1-5.

[4] 李芳兰，包维楷. 植物叶片形态解剖结构对环境变化的响应与适应[J]. 植物学通报，2005,40(S1):118-127.
LI F L, BAO W K. Responses of the morphological and anatomical structure of the plant leaf to environmental change[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2005,40(S1):118-127.

[5] 王玉萍，王庆艳，王玉漾. 中国蓼属药用植物综述[J]. 时珍国药研究，1996,7(3):172-173.
WANG Y P, WANG Q Y, WANG Y Y. Review on medicinal plants of *Polygonum* in China[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 1996,7(3):172-173.

[6] BUNAWAN H, CHOONG C Y, MD-ZAIN B M, et al. Systematics of *Polygonum minus* Huds based on ITS sequences [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2011,12(11): 7626-7634.

[7] YANG H J, Kim M J, LIU K H l, et al. Immunomodulating properties of *Polygonum multiflorum* extracts on cyclophosphamide-induced immunosuppression model[J]. Indian Journal of Pharmaceutical Sciences, 2019,80(4):749.

[8] XUE G Y, WU J D, ZHOU B J, et al. Effects of shading on the growth and photosynthetic fluorescence characteristics of *Castanopsis hystrix* seedlings of top community-building species in southern subtropical China[J]. Forests, 2023,14(8):1659.

[9] YANG X J, DENG D M, YU F M, et al. Response of enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense systems of *Polygonum hydropiper* to Mn stress[J]. Journal of Central South University, 2016,23(4):793-797.

[10] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京：高等教育出版社，2000,19(2):102-105.
LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiology and biochemistry experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000,19(2):102-105

[11] 王复标，叶子飘. 植物电子传递速率光响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报，2024，48(03)：287-305.
WANG F B, YE Z P. Research progress on light response models of electron transport rate in plants[J]. Journal of Plant Ecology, 2024,48(03):287-305.

[12] 代大川，胡红玲，陈洪，等. 遮阴对桢楠幼苗生长和光合生理特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2020,48(4):56-64,74.
DAI D C, HU H L, CHEN H, et al. Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of *Phoebe zhennan* seedlings[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020,48(4):56-64,74.

[13] 韩忠明，田新，张福军，等. 遮荫对东北铁线莲生长、生理特性及质量的影响[J]. 吉林农业大学学报，2021，43(3)：303-309.
HAN Z M, TIAN X, ZHANG F J, et al. Effects of shading on growth, physiological characteristics and quality of *Clematis manshurica*[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2021, 43(3):303-309.

[14] 吴炜. 遮阴对粗肋草幼苗光合特性和养分积累的影响[J]. 亚热带农业研究，2022,18(2):113-118.
WU W. Effect of shading on photosynthetic characteristics and nutrient accumulation of *Aglaonema commutatun* seedling[J]. Subtropical Agriculture Research, 2022,18(2):113-118.

[15] 江新凤，李琛，蔡翔，等. 遮阴对“黄金菊”茶树生长与茶叶品质的影响[J]. 茶叶通讯，2019,46(4):424-428.
JIANG X F, LI C, CAI X, et al. Effects of shading treatment on growing and quality of ‘Huangjinju’ (*Camellia sinensis*) [J]. Journal of Tea Communication, 2019,46(4):424-428.

[16] 曹良军，刘宝臣，唐伟斌，等. 遮阴对麦冬叶面积和叶绿素含量的影响[J]. 中国园艺文摘，2011,27(7):1-3.
CAO L J, LIU B C, TANG W B, et al. Effect of shading on leaf area and chlorophyll contents of *Ophiopogonis japonicus* [J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2011,27(7):1-3.

[17] 韩睿婷，赵丹丹，王维艺，等. 遮阴对三种毛茛科植物光合特性的影响及耐阴性评价[J]. 广西植物，2024,44(11):2101-2112.
HAN R T, ZHAO D D, WANG W Y, et al. Effects of shading on photosynthetic characteristics and shade-tolerance evaluation of three Ranunculaceae plants[J]. Guihaia, 2024,44(11): 2101-2112.

[18] 姜瑞芳，刘艳红. 光照对珙桐幼苗光合与生长特性的影响[J]. 生态科学，2017,36(5):114-120.
JIANG R F, LIU Y H. Effects of light intensity on the photosynthesis and growth characteristics of *Davidia involucrata* seedlings[J]. Ecological Science, 2017,36(5):114-120.

[19] 尚海琳，李方民，林玥，等. 桃儿七光合生理特性的地理差异研究[J]. 西北植物学报，2008,28(7):1440-1447.
SHANG H L, LI F M, LIN Y, et al. Photosynthetic characteristics of *Sinopodophyllum hexandrum* from different distribution areas in China[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2008,28(7):1440-1447.

[20] 王晓冰，宋雅迪，庄静静，等. 不同光照条件下大百合光合生理特性研究[J]. 中药材，2019,42(7):1489-1493.
WANG X B, SONG Y D, ZHUANG J J, et al. Study on photosynthetic physiological characteristics of *Lilium brownii* under different light conditions[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2019,42(7):1489-1493.

[21] 郑雪燕. 遮阴处理对粗肋草生长、光合特性和养分质量分数的影响[J]. 东北林业大学学报,2022,50(12):31-36.
ZHENG X Y. Effects of shading on the growth, photosynthetic characteristics and nutrient accumulation of *Aglaonema commutatumd*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(12):31-36.

[22] 张云,夏国华,马凯,等. 遮阴对堇叶紫金牛光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(7):1940-1948.
ZHANG Y, XIA G H, MA K, et al. Effects of shade on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of *Ardisia violacea*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7):1940-1948.

[23] 刘卫琴,汪良驹,刘晖,等. 遮阴对丰香草莓光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 果树学报,2006,23(2):209-213.
LIU W Q, WANG L J, LIU H, et al. Effects of shading on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of Toyonoka strawberry cultivar[J]. Journal of Fruit Science, 2006,23(2):209-213.

[24] 梁芳,郑成淑,孙宪芝,等. 低温弱光胁迫及恢复对切花菊光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(1):29-35.
LIANG F, ZHENG C S, SUN X Z, et al. Effects of low temperature-and weak light stress and its recovery on the photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of cut flower *Chrysanthemum* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010,21(1):29-35.

[25] 杨欣霖,曹基武,谢乔颖,等. 青牛胆光合特性对遮阴的响应研究[J]. 湖南生态科学学报,2024,11(2):51-59.
YANG X L, CAO J W, XIE Q Y, et al. Study on the response of photosynthetic characteristics of *Tinospora sagittata* to shading[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2024, 11(2): 51-59.

[26] 刘悦秋,孙向阳,王勇,等. 遮荫对异株荨麻光合特性和荧光参数的影响[J]. 生态学报,2007,27(8):3457-3464.
LIU Y Q, SUN X Y, WANG Y, et al. Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Urtica dioica*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8):3457-3464.

[27] 冷寒冰,苏鸣,张春英. 锦绣杜鹃对不同光环境的光合特性响应及适应机制[J]. 生态学杂志,2023,42(8):1793-1801.
LENG H B, SU M, ZHANG C Y. Responses of photosynthetic traits and adaptive mechanisms of *Rhododendron pulchrum* Sweet to different light environments[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(8):1793-1801.

[28] 逯锦春,王延松,曹丽娜,等. 大花银莲花对高温胁迫的生理及荧光特性响应[J]. 草业科学,2023,40(7):1833-1843.
LU J C, WANG Y S, CAO L N, et al. Physiological and fluorescence characteristics of *Anemone silvestris* in response to high temperature stress[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(7): 1833-1843.

[29] 贾浩,郝建博,曹洪波,等. 遮荫对'保佳红'桃树叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的影响[J]. 西北植物学报,2015,35(9):1861-1867.
JIA H, HAO J B, CAO H B, et al. Effects of shading on fast chlorophyll fluorescence induction dynamics of 'Baojiahong' peach leaves[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015,35(9):1861-1867.

(责任编辑:李小平)