

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.05.002

宽叶泽苔草光合响应多因子测试结果的比较分析

何 华¹, 李 晖¹, 龙 晔¹, 姜 鹏¹, 周智勇²

(1. 云南大学, 云南 昆明 650091; 2. 昆明理工大学, 云南 昆明 650093)

摘 要:光强、温度、湿度是植物光合速率的主要影响因子,对植物的生理生态影响巨大。目前对植物单环境因子的光合响应研究很多,但是,对于多因子组合情况下的植物光合响应研究很少。本研究在冬季选取光强、温度、湿度3种主要环境因子进行多水平均匀设计,以期用较少的测试水平获得该季节宽叶泽苔草叶片随环境因子的变化而产生的光合响应变化规律。用Li-6400光合测定系统进行宽叶泽苔草对不同光照强度、温度、湿度组合因子的光合速率响应对比测试实验研究。对测试结果进行了多元一次线性、多元二次线性、多元非线性回归对比分析。结果表明:多元非线性回归方程对光照强度、温度、湿度多因子组合下的光合速率变化描述效果最好($R^2=0.958$),宽叶泽苔草光合速率与光照强度呈显著ln曲线相关,而非一次线性和二次线性相关。

关键词:宽叶泽苔草;光合速率;均匀设计;多因子组合;回归分析

中图分类号:Q945.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-5508(2018)05-0008-05

The Comparative Analysis of the Multiple-factor Test Results for Photosynthetic Rate of *Caldesia grandis*

HE Hua¹ LI Hui¹ LONG Ye¹ JIANG Peng¹ ZHOU Zhi-yong²

(1. Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Light intensity, temperature and humidity are the main influencing factors of photosynthetic rate, and they have a great influence on plant physiology. At present, there are a lot of studies on photosynthetic response of single environmental factor for plants. However, there are fewer researches on photosynthetic response of plants under the condition of multi-factor combination. In this study, three main environmental factors, namely, light intensity, temperature and humidity, were selected for multi-level uniform design in winter, aiming to obtain the law of photosynthetic rate changes of the leaves of *Caldesia grandis* Samuel. The photosynthetic rate of *C. grandis* was observed by means of Li-6400 Photosynthesis Analyzer to explore the influence of multiple factors (light intensity, temperature and humidity) upon the mature leaf. The comparative analysis indicated that multiple stepwise regression was the best among Linear Regression, multivariate quadratic regression, and multiple stepwise regression. The results indicated that light intensity was the primary factor that may affect photosynthetic rate of *C. grandis*. There was a significant positive correlation (ln curve) between the light intensity and the photosynthetic rate. The Adjusted R Square achieved 0.958.

Key words: *Caldesia grandis* Samuel., Photosynthetic rate, Uniform Design, Multiple factor, Regression analysis

收稿日期:2018-07-15

基金项目:基于比较分析的居住建筑能耗定额编制理论与方法研究——以云南为例(国家自然科学基金51268020)

作者简介:何华(1972-),女,湖南江华人,讲师,博士,研究方向:城市环境与生态工程, e-mail hehuakk@163.com。

宽叶泽苔草(*Caldesia grandis* Samuel.)为泽泻科泽苔草属的植物。它是一种珍稀濒危水生植物,曾经一度被认为已经从中国大陆灭绝,但2000年左右在湖南省的一个高山沼泽中被发现^[1],可用于园林水景绿化及盆栽观赏,也可用于水体边缘或浅水区种植。对于宽叶泽苔草的光合多因子响应分析研究有助于了解该植物的生理生态特性,为该物种的栽培、管理和养护提供数据支撑。

据研究,影响植物光合的因素主要有植物性状和环境因素两大类。植物性状有:物种差异^[2~3]、气孔导度^[4~5]、胞间CO₂浓度^[6~7]、株龄^[8]、叶龄^[9]、叶位^[10]和叶绿素含量等;环境因素有:光照强度^[11~12]、温度^[11,13]、湿度^[11,14]、二氧化碳浓度^[15~16]、光质^[17~18]、臭氧浓度^[19~20]、风速、NH₃、NO_x、酸雨和矿物质营养等。对生长于某一特定地点的某特定物种来说,光照强度、温度、湿度是环境因子中变化最为频繁,并且是影响其光合速率的主导环境因子。很多研究成果表明其光响应曲线的响应进程分别用 $y = a + bx$ 和 $y = ax^2 + bx + c$ 方程(x 为光子量照度, y 为净光合速率)拟合,求出光补偿点和光饱和点,通过线性回归求出光响应曲线直线方程的斜率,即表观量子效率^[21~23]。本研究对不同光照强度、温度、湿度组合因子下的宽叶泽苔草叶片的光合速率变化状况进行了测试,并进行了相关数据的多元一次、多元二次、多元多次回归分析,以确定采用何种回归方式对该性状变化的解释性最好。

1 材料与方 法

1.1 试验地基本情况

深圳梅林公园建于2003年6月,位于梅林水库东侧,梅林一村北面,占地面积27 hm²。公园用地一部分是连绵的山体,一部分是伸向城市建筑群的四个半岛式的山体。本研究所选取的测试区域是山谷中部的一片小池塘,池塘内及周围植被皆生长茂密、长势良好,是开展植物生理生态测试的理想场所。于2009年12月13日上午11:08—12:02,选取水中长势良好的完全展开并接受完全光照的中部成熟叶片进行光照强度、温度、湿度多因子模拟测试。

1.2 试验设备

美国生产的LI-6400型便携式光合测定仪、CO₂小钢瓶、干燥剂、小苏打。在测试中,需要使用干燥剂和加湿器来控制湿度、利用调温设备控制温度,测

试各种气象参数(光强、温度、湿度)组合下的光合速率值。

1.3 试验方法

该试验设计就是考虑如何在试验域内最有效地选择试验水平点,通过试验得到相应的观测值,然后进行数据分析求得最优响应方程。因此,该试验设计的目标,就是要用最少的试验水平组合取得关于多因子响应系统的尽可能充分的信息。经笔者多方方案比较后最终选择均匀设计来实现这一目标,因为均匀设计对多因素、多水平的试验尤其适合^[24]。

根据深圳市典型气象年数据对冬季气象参数区间进行整理可得:温度区间为6℃~32℃,湿度区间为19%~100%,光合有效辐射区间为0~1 815.656 μmol·m⁻²·s⁻¹,故而该试验光照强度设定为20 μmol·m⁻²·s⁻¹~1 800 μmol·m⁻²·s⁻¹。由于受到试验设备温度、湿度控制范围的限制,温度可调范围在环境温度±3℃、湿度可调范围在20%~80%之间,故而对3因子进行7点均匀设计(见表1)。

表 1 植物光合速率测试现场用表

Tab. 1 The table of testing the photosynthetic rate of plants

测试组合 Test battery	温度 Temperature (℃)	相对湿度 Relative humidity (%)	光强 Light intensity (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
1	24	60	1800
2	27	30	1500
3	22	80	1200
4	25	50	900
5	28	20	600
6	23	70	300
7	26	40	30

注:采用的是U₇^{*}(7⁴)和其使用表的S(3)(D=0.2132)

2 结果与分析

2.1 泽苔草的光合测试数据整理

从表2和表3可知,在很弱的光照强度30 μmol photons·m⁻²·s⁻¹下,宽叶泽苔草便能进行光合作用。净光合速率和光照强度呈对数相关关系(30 μmol photons·m⁻²·s⁻¹~300 μmol photons·m⁻²·s⁻¹、300 μmol photons·m⁻²·s⁻¹~1800 μmol photons·m⁻²·s⁻¹)。光照在30 μmol photons·m⁻²·s⁻¹~300 μmol photons·m⁻²·s⁻¹时,光合速率从0.66 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹迅速增加到7.65 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹;而光照在300 μmol photons·m⁻²·s⁻¹~900 μmol photon·m⁻²·s⁻¹时,光合速

率从 $7.65 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $9.09 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 增加的速度比上一个光强段慢; 超过 $900 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 后, 增加的趋势更为缓慢。光强从 $900 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

$\sim 1800 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 增加了 $900 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 而净光合速率仅增加了 $1 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 尽管增加的极其微小, 但在所测的光强范围内, 泽苔草并未出现光饱和点。

表2 宽叶泽苔草的光合测试数据

Tab.2 Original photosynthetic rate and environmental factors record table of *Caldesia grandis* simulating tests

序号 Order number	光合速率 Photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	r(光强) Light intensity ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	h(湿度) Relative humidity (%)	t(温度) Temperature(°C)
1组	10.1077405	1801.493164	60.28679657	23.98516083
1 group	10.08151106	1801.508057	60.28350067	23.98470497
	10.09896638	1799.325684	60.28187561	23.98412895
2组	9.825609058	1500.030884	30.99657631	26.99653053
2 group	9.827344204	1500.020142	30.99377823	27.00120354
	9.822667007	1500.12915	30.98014259	27.01122284
3组	9.760736638	1200.782959	79.94468689	22.01360893
3 group	9.751407689	1201.004761	79.96173096	22.01041222
	9.754648938	1201.002686	79.95977783	22.01021576
4组	9.106630295	900.670105	49.96055984	25.00810051
4 group	9.066122749	900.7081299	49.95374298	25.01221657
	9.1078579	900.6651001	49.95287704	25.01246643
5组	8.738272546	599.9636841	24.69152451	27.99929619
5 group	8.713822405	599.8967285	24.68572998	27.99973679
	8.731513977	599.8681641	24.6906929	28.00152397
6组	7.711033827	301.1125183	69.88523865	22.95764923
6 group	7.621022821	301.1865234	69.9148407	22.95302582
	7.626890363	301.1098633	69.91688538	22.95252037
7组	0.649435629	30.72758102	38.85873795	26.0457077
7 group	0.658858625	30.49007034	40.00531387	26.00489044
	0.674403191	30.53872108	39.96973038	26.00941658

表3 宽叶泽苔草的光合测试数据整理均值描述增加标准差

Tab.3 Reorganized photosynthetic rate and environmental factors record table of *Caldesia grandis* simulating tests

序号 Order number	光强 r Light intensity ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对湿度 h Relative humidity (%)	温度 t Temperature(°C)	光合速率 Photosynthetic rate ($\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1800.775635(1.255716627)	60.28405762(0.00250731)	23.98466492(0.000517103)	10.09607265(0.013352008)
2	1500.060059(0.060075835)	30.99016571(0.008792296)	27.00298564(0.007506522)	9.825206757(0.002364409)
3	1200.930135(0.127462471)	79.95539856(0.009327839)	22.0114123(0.001904872)	9.755597755(0.004736298)
4	900.6811117(0.023531909)	49.95572662(0.004208026)	25.01092784(0.002451722)	9.093536981(0.023749355)
5	599.9095256(0.049028988)	24.6893158(0.003133121)	28.00018565(0.001179772)	8.727869643(0.014743633)
6	301.1363017(0.043513576)	69.90565491(0.017710531)	22.95439847(0.00282656)	7.652982337(0.050359593)
7	30.58545748(0.125463338)	39.61126073(0.651946665)	26.02000491(0.022374019)	0.660899148(0.012608235)

注:上述各值皆为每一组下3次测试值的平均数及标准差。

2.2 泽苔草的光合测试数据分析

用SPSS统计分析软件对泽苔草的光合模拟测试数据所进行的多元一次线性回归分析、多元二次非线性回归分析和多元多次非线性回归分析。

2.2.1 多元一次线性回归分析

调整后判定系数 R^2 为 0.26, 方程拟合度很差; 回归方程未通过显著性检验 $0.337 > \alpha = 0.05$, 多元一次回归方程不成立。说明光强 r、湿度 h、温度 t 值

与泽苔草光合速率值均无线性相关关系(见表4、表5和表6)。

表4 多元一次线性回归模型汇总表

Tab.4 Model Summary of Multivariate Linear Regression

相关系数 R	决定系数 R Square	调整后决定系数 Adjusted R Square	估计标准误差 Std. Error of the Estimate
.794 ^a	.630	.260	2.85692

a. 预测变量:(常数), t 温度, r 光强, h 湿度

表 5 多元一次线性回归方差分析表

Tab. 5 Anova of Multivariate Linear Regression

差异源 Model	总离差平方和 Sum of Squares	自由度 df	均方 Mean Square	F 检验 F	显著性 水平 Sig.
回归 egression	41.580	3	13.860	1.702	.337 ^b
残差 Residual	24.435	3	8.145		
总和 Total	66.014	6			

a. 因变量:光合速率 b. 预测变量:(常数),t 温度,r 光强,h 湿度

表 6 多元一次线性回归模型回归系数表

Tab. 6 Coefficients of Multivariate Linear Regression

差异源 Model	非标准化系数 Unstandardized Coefficients		标化系数 Standardized Coefficients		t 检验 t	显著性 水平 Sig.
	截距 B	标准差 Std. Error	标准化回归系数 Beta			
常数 (Constant)	133.888	1596.128			.084	.938
光强 r	.004	.003	.813		1.215	.311
湿度 h	-.423	5.389	-2.732		-.078	.942
温度 t	-4.344	53.152	-2.839		-.082	.940

2.2.2 多元二次线性回归分析

调整后判定系数 R² 为 0.932, 方程拟合度较高;但回归方程未通过显著性检验 0.077 > α = 0.05, 多元二次回归方程不成立。说明光强 r、rr、tt 值与泽苔草光合速率值均无线性相关关系(见表 7、表 8 和表 9)。

表 7 多元二次线性回归模型汇总表

Tab. 7 Model Summary of Multivariate Quadratic Linear Regression

相关系数 R	决定系数 R Square	调整后决定系数 Adjusted R Square	估计标准误差 Std. Error of the Estimate
.932 ^a	.869	.738	1.69713

a. 因变量:(常数),tt,r 光强,rr

表 8 多元二次线性回归方差分析表

Tab. 8 ANOVA of Multivariate Quadratic Linear Regression

差异源 Model	总离差平方和 Sum of Squares	自由度 df	均方 Mean Square	F 检验 F	显著性 水平 Sig.
回归 Regression	57.374	3	19.125	6.640	.077 ^b
残差 Residual	8.641	3	2.880		
总和 Total	66.014	6			

a. 因变量:光合速率;c. 预测变量:(常数),tt,r 光强,rr

表 9 多元二次线性回归模型回归系数表

Tab. 9 Coefficients of Multivariate Quadratic Linear Regression

差异源 Model	非标准化系数 Unstandardized Coefficients		标化系数 Standardized Coefficients		t 检验 t	显著性 水平 Sig.
	截距 B	标准差 Std. Error	标准化回归系数 Beta			
常数 (Constant)	4.138	4.454			.929	.421
光强 r	.013	.004	2.542		3.255	.047
rr	-5.026E-6	.000	-1.841		-2.356	.100
tt	-.004	.006	-.117		-.552	.619

2.2.3 多元非线性回归分析

调整后判定系数 R² 为 0.958, 方程拟合度极高;回归方程通过显著性检验 0.001 < α = 0.05, 采用多元非线性回归分析可得到以下泽苔草光合速率方程:

$$P = 2.286 \ln r - 0.002 t^2 - 5.326 \quad (1)$$

根据公式 1.1 计算可得宽叶泽苔草光补偿点为 17.75 μmol photons · m⁻² · s⁻¹, 在光强极弱 (< 17.75 μmol photons · m⁻² · s⁻¹) 时, 光合速率低于呼吸速率。在光强 > 17.75 μmol photons · m⁻² · s⁻¹ 时, 光合速率大于呼吸速率, 叶片开始合成有机物。其较低的光补偿点说明泽苔草光合作用对弱光的利用能力较强, 具有一定耐阴性。随着光照强度的增加, 从 30 增至 300 μmol photons · m⁻² · s⁻¹, 净光合速率迅速增大, 即光合作用诱导期, 在这一阶段, 光合作用机构高速运转, 光合碳同化酶被充分活化, 气孔更加开放, 光合速率从 0.66 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹ 迅速增加到 7.65 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹。随着光强进一步增加, 从 300 增至 900 μmol photons · m⁻² · s⁻¹, 光合速率从 7.65 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹ 增加到 9.09 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹, 净光合速率增长趋缓。当光强从 900 增至 1 800 μmol photon · m⁻² · s⁻¹ 时, 光合速率增加的趋势更为缓慢, 仅增加了 1 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹, 意味着接近其光饱和点, 光强的继续增加对光合速率的增长贡献不大。其高光饱和点, 说明泽苔草是喜阳植物, 植物对太阳能的利用率较高, 生产潜力较大。由该方程可知宽叶泽苔草光合速率的主要环境影响因子是光强, 光强与光合速率呈 ln 曲线正相关。宽叶泽苔草的光合速率对温度变化的响应表现为二次方式负相关, 即最适温度下光合速率大, 偏离越多光合速率越小。但从温度系数为 -0.002 可以看出其影响远较光照强度的影响要小得多。或者因为宽叶泽苔草根系在池塘水中, 植株并不缺乏水分的供应, 故而宽叶泽苔草的光合速率值对空气湿度的变化响应不显著, 空气湿度变化对宽叶泽苔草光合速率无影响(见表 10、表 11 和表 12)。

表 10 多元非线性回归模型汇总表

Tab. 10 Model Summary of Multivariate Nonlinear Regression

相关系数 R	决定系数 R Square	调整后决定系数 Adjusted R Square	估计标准误差 Std. Error of the Estimate
.986 ^a	.972	.958	.68278

表 11 多元非线性回归方差分析表

差异源 Model	总离差平方和 Sum of Squares	自由度 df	均方 Mean Square	F 检验 F	显著性 水平 Sig.
回归 egression	64.150	2	32.075	68.802	.001 ^b
残差 Residual	1.865	4	.466		
总和 Total	66.014	6			

a. 因变量: 光合速率; b. 预测变量: (常数), lnr, tt

表 12 多元非线性回归模型回归系数表

差异源 Model	非标准化系数 Unstandardized Coefficients		标准化系数 Standardized Coefficients	t 检验 t	显著性 水平 Sig.
	截距 B	标准差 Std. Error	标准化回归系数 Beta		
常数 (Constant)	-5.326	2.229		-2.389	.075
tt	-.002	.003	-.063	-.739	.501
lnr	2.286	.200	.974	11.454	.000

3 讨论

从用 SPSS 统计分析软件对宽叶泽苔草的光合模拟测试数据所进行的多元一次线性回归分析、多元二次线性回归分析和多元非线性回归分析的实例比较分析中,我们可以看出基于植物各影响因素作用的多元非线性回归分析对地毯草光合速率的回归效果最好,调整后判定系数 R^2 为 0.958,而多元二次和多元一次线性回归的判定系数 R^2 分别是 0.738 和 0.26,回归效果不好。后续设想将这种多元非线性回归分析的方法应用到其他植物的光合速率环境因子回归分析中,进一步探索及检验其合理性。

4 结论

改进后的多元非线性回归方程效果最佳,多元非线性回归方程判定系数为 $R^2 = 0.958$,高于多元二次($R^2 = 0.738$)和多元一次方程($R^2 = 0.26$)的拟合度,方程的解释性很好。该多元非线性回归方程对其生理现象的解释性很好:宽叶泽苔草的光合速率在光饱和点以下与其光强呈对数形式显著正相关,说明 lnr 曲线比直线和二次曲线能够更好地说明光合速率与光强间的相关性,很多研究成果表明光响应曲线的响应方程 $y = a + bx$ 和 $y = ax^2 + bx + c$ (x 为光子量照度,y 为净光合速率)对宽叶泽苔草并不适用。这种相关性和较低的光补偿点说明宽

叶泽苔草具有喜光耐阴的特征。当 PAR 从 17.75 增加到 300 $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时光合速率值从 0.66 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 迅速增加至 7.62 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。另外从泽苔草的光补偿点较低 17.75 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光饱和点大于 1800 $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,说明宽叶泽苔草是一种对光环境适应性较强的阳性水生草本植物,在当地的栽培管理中无需进行补充照明或者遮荫处理。

应用前景:该测试方法和分析方法可以用于其他物种的多因子测试和分析,旨在通过较少的测试次数得到较为全面的数据组合,为不同栽培植物光合速率关键因子的确立提供数据支撑,为果树、农作物、园林植物的栽培管理提供环境因子控制依据。

参考文献:

- [1] 王勇,王青锋,Gitu ru W. Robert,等.珍稀水生植物——宽叶泽苔草的核型研究[J].武汉植物学研究,2001,19(3):187~190.
- [2] 罗英.8种园林树木生理特征及其生态效应的研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2004.
- [3] 刘伟丽.苏铁光合特性的研究[D].广西大学,2007.
- [4] 李林锋.4种湿地植物光合作用特性的比较研究[J].西北植物学报,2008,(10):2094~2102.
- [5] 廖德宝,白坤栋,曹坤芳,等.广西猫儿山中山森林共生的常绿和落叶阔叶树光合特性的季节变化[J].热带亚热带植物学报,2008,(03):205~211.
- [6] 宋庆安,李昌珠,童方平,等.光皮树优良无性系光合生理特性对光强的响应[J].湖南林业科技,2008(6):3~6.
- [7] 薛建平,王兴,张爱民,等.地黄光合特性研究[J].中国中药杂志,2009(6):778~780.
- [8] 高增璐,高玉葆,郑志荣,等.皇甫川流域梁地生境中间锦鸡儿不同龄级植株光合生理特性的比较研究[J].植物研究,2009,29(2):182~186.
- [9] 王广军,张彦妮,何叶.不同情况复叶槭(Acer negundo L)叶片净光合速率的日变化[J].东北林业大学学报,2008,36(8):14,15,28.
- [10] 李建斌,李建明,邹志荣,等.厚皮甜瓜苗期叶片光合、光呼吸及暗呼吸速率的变化[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2008,(7):57~63.
- [11] 刘金祥,陈睿俊.香根草、黑麦草和高丹草光合生理生态日变化的比较研究[J].热带农业科学,2008(8):32~37.
- [12] 柴胜丰,韦霄,曾丹娟,等.光照强度对广西地不容生长和光合特性的影响[A].第五届中国青年生态学工作者学术研讨会论文集[C],2008:130~137.
- [13] Salvucci M E,Portis A R,Ogren W L. Light and CO₂ response of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activation in Arabidopsis leaves. Plant Physiol.,1986,80:655~659.

(下转第92页)

- in *Lactuca sativa* [J]. *Protoplasma*, 2009, 2(5):197~205.
- [20] 邓旭,王娟,谭济才.外来入侵种豚草对不同环境胁迫的生理响应[J].植物生理学报,2010,46(10):1013~9.
- [21] 王敬华,张立芳,施国新,等.镍添加对水鳖(*Hydrocharis dubia*)叶片镍和营养元素含量以及氧化胁迫和抗氧化系统的影响[J].湖泊科学,2016,28(3):599~608.
- [22] Prashanth S, Sadhasivam V, Parida A. Over expression of cytosolic copper/zinc superoxide dismutase from a mangrove plant *Avicennia marina* in indica rice var Pusa Basmati - 1 confers abiotic stress tolerance [J]. *Transgenic Research*, 2008, 17(2):281~91.
- [23] 谢亚军,王兵,梁新华,等.干旱胁迫对甘草幼苗活性氧代谢及保护酶活性的影响[J].农业科学研究,2008,29(4):19~22.
- [24] 陈少裕.膜脂过氧化与植物逆境胁迫[J].植物学报,1989,6(4):211~217.
- [25] 田治国,王飞.不同品种万寿菊对镉胁迫的生长和生理响应[J].西北植物学报,2013,33(10):2057~2064.
- [26] 蒋明义,杨文英,徐江,等.渗透胁迫诱导水稻幼苗的氧化伤害[J].作物学报,1994,(6):733~738.
- [27] 刘柿良,杨容子,马明东,等.土壤镉胁迫对龙葵(*Solanum nigrum* L.)幼苗生长及生理特性的影响[J].农业环境科学学报,2015,(2):240~247.
- [28] 苏明洁,廖源林,叶充,等.镉胁迫下苦楝(*Melia azedarach* L.)幼苗的生长及生理响应[J].农业环境科学学报,2016,35(11):2086~2093.
- [29] 简敏菲,杨叶萍,余厚平,等.不同浓度Cd²⁺胁迫对苎麻叶绿素及其光合荧光特性的影响[J].植物生理学报,2015,(8):1331~1338.
- [30] 贾中民,王力,魏虹,等.垂柳和旱柳对镉的积累及生长光合响应比较分析[J].林业科学,2013,49(11):51~59.

(上接第12页)

- [14] 孔宪辉,韩焕勇,宁新柱,等.不同水分处理对棉花叶片叶绿素含量、光合速率及产量的影响研究[J].现代农业科技,2008(5):131~132.
- [15] 刘晓军,唐晓波,李春华.不同绿茶品种秋季叶绿素与光合效率比较及相关性研究[J].西南农业学报,2008,21(4):975~978.
- [16] 和世平,王荔,陈疏影,等.半夏无糖组培苗营养生长和光合生理对增施CO₂的响应[J].云南农业大学学报,2009(2):204~209.
- [17] 付传明,黄宁珍,赵志国,等.光质与补光对水稻幼苗生长及光合速率的影响[J].广西植物,2007,27(2):255~259.
- [18] 徐凯,郭延平,张上隆.不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响[J].中国农业科学,2005,38(2):369~375.
- [19] IPCC. Climate Changes 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK/New York, USA: Cambridge University Press, 2002. 239~287.
- [20] Karnosky D F, Zak D R, Pregitzer K S, et al. Tropospheric O₃ moderates responses of temperate hardwood forests to elevated CO₂: a synthesis of molecular to ecosystem results from the Aspen FACE project [J]. *Functional Ecology*, 2003, 17:289~304.
- [21] 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.
- [22] 李鸣光,成秀媛,刘斌,余华.金钟藤的快速生长和强光合能力[J].中山大学学报(自然科学版),2006,45(3):70~72.
- [23] 靳忠英,彭正松,李育明,等.半夏的光合特性[J].作物学报,2006,32(10):1542~1548.
- [24] 方开泰,马长兴.正交设计与均匀设计的关联和比较[C].均匀设计理论及其应用研讨会论文集,香港,1999:8~40.