

不同质量浓度多效唑对碗莲品种‘火花’生长和叶片部分生理指标的影响

李欣, 江君, 徐君, 朱建华, 姜红卫^①
(苏州市农业科学院, 江苏 苏州 215155)

摘要: 研究了不同质量浓度(0~50 mg·L⁻¹)多效唑对碗莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)品种‘火花’(‘Huohua’)生长的影响及多效唑处理过程中叶片部分生理指标的变化,并进行了隶属函数值分析和相关性分析。结果表明:质量浓度10~50 mg·L⁻¹多效唑处理抑制碗莲品种‘火花’生长。随着多效唑质量浓度提高,立叶数、立叶长、立叶宽、立叶高、花径、花高和开花总数总体上呈逐渐降低的趋势,且总体上与对照组(质量浓度0 mg·L⁻¹多效唑)差异显著。随着处理时间延长,质量浓度10~50 mg·L⁻¹多效唑处理组叶片中丙二醛(MDA)含量、过氧化物酶(POD)活性和多酚氧化酶(PPO)活性的变化趋势各异;质量浓度10~50 mg·L⁻¹多效唑处理组叶片中可溶性蛋白质含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性,以及质量浓度10、20和30 mg·L⁻¹多效唑处理组叶片中过氧化氢酶(CAT)活性总体上呈先升高后降低的变化趋势,而质量浓度40和50 mg·L⁻¹多效唑处理组叶片中CAT活性则呈逐渐降低的变化趋势。相关性分析结果表明:碗莲品种‘火花’生长指标的隶属函数值间以及叶片中可溶性蛋白质含量和POD活性的隶属函数值与生长指标的隶属函数值间的相关性总体在0.05或0.01水平上显著。研究结果显示:质量浓度10、20和30 mg·L⁻¹多效唑处理可有效控制碗莲品种‘火花’生长,提高其观赏性;且其生长指标以及叶片中可溶性蛋白质含量和POD活性可以作为判断碗莲品种‘火花’矮化效果的可靠、简易指标。

关键词: 碗莲品种‘火花’;多效唑;生长;生理指标;隶属函数值分析;相关性分析

中图分类号: Q948.8; S482.8⁺92; S682.32 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2017)03-0051-08
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.03.07

Effects of paclobutrazol with different mass concentrations on growth and some physiological indexes of leaves of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus (*Nelumbo nucifera*) LI Xin, JIANG Jun, XU Jun, ZHU Jianhua, JIANG Hongwei^① (Suzhou Academy of Agricultural Sciences, Suzhou 215155, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(3): 51-58

Abstract: The effects of paclobutrazol with different mass concentrations (0-50 mg·L⁻¹) on growth of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.), and changes in some physiological indexes of leaves during paclobutrazol treatment period were studied, and analyses on subordinate function value and correlation were conducted. The results show that the paclobutrazol treatments with mass concentration of 10-50 mg·L⁻¹ inhibit the growth of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus. With increasing of mass concentration of paclobutrazol, number, length, width and height of standing leaves, diameter and height of flowers, and total flower number generally decrease gradually, and in general, there is a significant difference with the control group (paclobutrazol with mass concentration of 0 mg·L⁻¹). With prolonging of treatment time, change trends in malondialdehyde (MDA) content, peroxidase (POD) activity and polyphenol oxidase (PPO) activity in leaves in paclobutrazol treatment groups with mass concentration of 10-50 mg·L⁻¹ are different. Soluble protein content and superoxide dismutase (SOD) activity in leaves in paclobutrazol treatment groups with mass concentration of 10-50 mg·L⁻¹, and

收稿日期: 2016-12-07

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20151229); 苏州市科技计划项目(SNG201508)

作者简介: 李欣(1982—),女,黑龙江鹤岗人,硕士,助理研究员,主要从事观赏植物种质资源抗性评价方面的研究。

^①通信作者 E-mail: sacjhw@163.com

catalase (CAT) activity in leaves in paclobutrazol treatment groups with mass concentration of 10, 20 and 30 mg · L⁻¹ generally increase at first and then decrease, while CAT activity in leaves in paclobutrazol treatment groups with mass concentration of 40 and 50 mg · L⁻¹ shows a tendency to decrease gradually. The correlation analysis result shows that the correlation among subordinate function values of growth indexes, and the correlation of subordinate function values of soluble protein content and POD activity in leaves with those of growth indexes of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus are generally significant at 0.05 or 0.01 level. It is suggested that paclobutrazol treatments with mass concentration of 10, 20 and 30 mg · L⁻¹ can effectively control the growth of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus, and improve its ornamental property. The growth indexes, soluble protein content and POD activity in leaves could be used as reliable and simple indicators to judge the dwarf effect of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus.

Key words: cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.); paclobutrazol; growth; physiological index; subordinate function value analysis; correlation analysis

荷花 (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) 为莲科 (Nelumbonaceae) 莲属 (*Nelumbo* Adans.) 植物, 集观赏、食用、药用价值于一身, 为中国传统十大名花中唯一的水生花卉, 花香四溢, 花色多变, 深受人们喜爱。碗莲是立叶高不超过 33 cm、立叶直径不超过 24 cm、花径不超过 12 cm 的荷花类型, 属于小型荷花, 因其小巧秀美、花色多变及适合家养等优点, 拥有广阔的应用前景^[1-2]。

在实际观赏应用中, 碗莲多置于桌几之上, 叶和花过高以及不适宜小型容器种植是限制其推广的重要因素, 因此, 开展碗莲矮化研究对碗莲产业发展具有重要意义。已有研究表明: 多效唑 (PP₃₃₃) 对植物株形有明显的抑制作用^[3-5]。碗莲品种‘火花’ (‘Huohua’) 原产于江苏, 现已推广到全国各地, 其叶盾状、圆形, 叶柄粗壮、被短刺; 花单生于花梗顶端, 花蕾桃形、紫红色, 花红色, 单瓣型, 具有较高的观赏价值^[2]。鉴于此, 作者研究了多效唑对碗莲品种‘火花’生长的抑制效果, 筛选适宜的多效唑质量浓度及与评价相关的生长和生理指标, 以期为培育株型娇小、适合桌面种植观赏的碗莲品种奠定基础。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料为碗莲品种‘火花’。于 2015 年 4 月 1 日选取生长健壮一致、无病虫害、顶芽完整、具有 2 节完整藕身的地下茎, 种植于直径 30 cm、高 30 cm 的不透水塑料盆中, 每盆加入 1 kg 烘干的菜园土。每盆种植 1 支地下茎, 种植后盆内保持满水, 每 7 d 施氮、磷、钾复合肥 [$m(N) : m(P) : m(K) = 15 : 15 : 15$] 5 g。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 实验在苏州市农业科学院水生植物基地避雨棚内进行。于 2015 年 4 月 10 日选择长势良好、浮叶展开的盆栽苗施加多效唑 (有效成分含量 50% 的可湿性粉剂, 安阳全丰生物科技有限公司)。将盆中水倒掉, 加入相应质量浓度的多效唑溶液至满盆, 每个处理 10 盆。多效唑溶液质量浓度共设置 6 个水平: 0 (CK)、10、20、30、40 和 50 mg · L⁻¹。于 6 月 10 日进行生长指标测定; 分别于 6 月 10 日、6 月 20 日、6 月 30 日、7 月 10 日、7 月 20 日和 7 月 30 日取样进行生理指标测定。在整个实验期间, 每日早上 6:00 用蒸馏水补足至盆内满水。

1.2.2 生长指标的统计和测量方法 统计盆内所有直立叶片的数量为立叶数; 用直尺 (精度 1 mm) 分别测量最高立叶的长径和短径, 分别为立叶长和立叶宽; 用直尺测量盆边到立叶最高点的直线距离为立叶高; 用直尺测量盛花期花朵的最大直径为花径; 用直尺测量花朵盛开期盆边到花朵最高点的直线距离为花高; 统计盆内所有盛开花的花朵数量为开花总数。各生长指标均重复统计和测量 6 株, 结果取平均值。

1.2.3 叶片中部分生理指标的测定方法 每处理选取 6 株, 将新采摘的生长良好的完整立叶, 用去离子水冲洗干净, 剪碎、混合后进行生理指标测定。丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸法^{[6]260-261}测定; 可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 法^{[6]184-185}测定; 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑法^{[6]167-169}测定; 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法^{[6]164-165}测定; 过氧化氢酶 (CAT) 活性采用高锰酸钾滴定法^{[6]165-167}测定; 多酚氧化酶 (PPO) 活性采用分光光度计比色法^[7]测定。各生理指标均重复测定 3 次, 结果取平均值。

1.3 数据处理和分析

采用模糊数学的隶属度公式,对不同质量浓度多效唑处理下碗莲生长指标及叶片中部分生理指标进行定量转换,其中,生理指标取不同处理时间的平均值进行定量转换。指标值随多效唑质量浓度提高而增大则为正相关,隶属函数值的计算公式为 $Z_{ij} = (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin})$; 指标值随多效唑质量浓度提高而减小为负相关,隶属函数值的计算公式为 $Z_{ij} = 1 - [(X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin})]$ 。式中, Z_{ij} 为 i 浓度 j 指标的隶属函数值, X_{ij} 为 i 浓度 j 指标的测定值, X_{imax} 和 X_{imin} 分别为 i 浓度处理组该指标的最大值和最小值。

实验数据采用 EXCEL 2007 软件进行整理;采用 SPSS 21.0 统计分析软件进行方差分析、隶属函数值分析和相关性分析。

2 结果和分析

2.1 不同质量浓度多效唑对碗莲品种‘火花’生长的影响

不同质量浓度多效唑对碗莲品种‘火花’生长指

标的影响见表 1。由表 1 可以看出:不同质量浓度多效唑处理均显著抑制碗莲品种‘火花’立叶和花的生长。随着多效唑质量浓度提高,碗莲品种‘火花’的立叶数、立叶长、立叶宽、立叶高、花径、花高和开花总数均较对照组(质量浓度 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑)有不同程度的降低,且总体上呈逐渐降低的趋势,各生长指标均在质量浓度 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组降至最低值。

由表 1 还可以看出:质量浓度 $10 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组碗莲品种‘火花’的立叶数、立叶长、立叶宽、立叶高、花径和花高均较对照组降低,且在 0.01 水平上差异显著,其中,质量浓度 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组的立叶数、立叶长、立叶宽、立叶高、花径和花高分别较对照组减小了 62.1%、50.5%、62.6%、45.9%、30.2%和 43.9%。质量浓度 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组的开花总数较对照组减少了 1.0 朵,差异不显著;质量浓度 20、30、40 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组的开花总数分别较对照组减少了 25.6%、29.7%、37.0%和 74.1%,在 0.05 或 0.01 水平上差异显著,其中,质量浓度 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组的开花总数较质量浓度 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组减少了 3.4 朵,且在 0.01 水平上差异显著。

表 1 不同质量浓度多效唑对碗莲品种‘火花’生长指标的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Effects of paclobutrazol with different mass concentrations on growth indexes of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

多效唑质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Mass concentration of paclobutrazol	立叶数 Standing leaf number	立叶长/cm Standing leaf length	立叶宽/cm Standing leaf width	立叶高/cm Standing leaf height	花径/cm Flower diameter	花高/cm Flower height	开花总数 Total flower number
0	8.7±1.2aA	18.2±0.8aA	16.3±0.5aA	13.3±0.6aA	8.6±0.3aA	13.9±1.2aA	9.0±1.0aA
10	7.3±0.6bB	13.5±1.1bB	9.6±0.8bB	10.7±0.2bB	7.5±0.4bB	11.3±0.5bB	8.0±1.0abAB
20	6.0±1.0cC	11.1±0.5cC	8.8±0.4bcBC	10.2±0.6bcB	7.2±0.3bBC	10.8±0.2bcB	6.7±0.6bcAB
30	6.3±0.6cBC	9.5±0.2dCD	8.5±0.9cBC	9.5±0.2cBC	6.9±0.2bBCD	9.9±0.3cB	6.3±1.2bcB
40	5.7±0.6cC	9.2±0.4dD	8.2±0.7cC	8.4±0.8dCD	6.2±0.6cCD	9.7±0.1cB	5.7±0.6cB
50	3.3±0.6dD	9.0±0.3dD	6.1±0.5dD	7.2±0.6eD	6.0±0.3cD	7.8±0.7dC	2.3±0.6dC

¹⁾ 同列中不同的小写和大写字母分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Different lowercases and capitals in the same column indicate the significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.2 不同质量浓度多效唑对碗莲品种‘火花’叶片中部分生理指标的影响

2.2.1 对叶片中丙二醛(MDA)含量的影响 不同质量浓度多效唑对碗莲品种‘火花’叶片中 MDA 含量的影响见表 2。由表 2 可以看出:6 月 10 日至 6 月 30 日以及 7 月 30 日,质量浓度 $10 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组碗莲品种‘火花’叶片中 MDA 含量总体上低于对照组(质量浓度 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑);7 月 10 日

和 7 月 20 日,质量浓度 $10 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中 MDA 含量总体上高于对照组。6 月 10 日、6 月 20 日和 6 月 30 日,质量浓度 30 和 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中 MDA 含量与对照组间存在显著差异。7 月 10 日、7 月 20 日和 7 月 30 日,质量浓度 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中 MDA 含量最高,分别较对照组升高了 141.9%、97.1%和 5.8%,其中 7 月 10 日和 7 月 20 日该处理组与对照组间差异显著。

表2 不同质量浓度多效唑对碗莲品种‘火花’叶片中丙二醛(MDA)含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 2 Effects of paclobutrazol with different mass concentrations on malondialdehyde (MDA) content in leaves of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

多效唑质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Mass concentration of paclobutrazol	不同处理时间(MM-DD)叶片中MDA含量/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ MDA content in leaves at different treatment times (MM-DD)					
	06-10	06-20	06-30	07-10	07-20	07-30
0	0.071±0.007a	0.047±0.010b	0.085±0.017a	0.031±0.023bc	0.035±0.004b	0.052±0.003ab
10	0.047±0.016ab	0.036±0.008bc	0.031±0.002ab	0.057±0.004ab	0.044±0.020ab	0.045±0.007ab
20	0.044±0.009ab	0.033±0.004bc	0.042±0.036ab	0.015±0.002c	0.035±0.012b	0.039±0.008ab
30	0.043±0.006b	0.070±0.001a	0.029±0.019b	0.051±0.050abc	0.016±0.003b	0.020±0.005c
40	0.027±0.001b	0.021±0.002c	0.020±0.005b	0.075±0.001a	0.069±0.002a	0.055±0.012a
50	0.047±0.028ab	0.031±0.008bc	0.039±0.002ab	0.064±0.025ab	0.040±0.010ab	0.036±0.008b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示在0.05水平上差异显著 Different lowercases in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

2.2.2 对叶片中可溶性蛋白质含量的影响 不同质量浓度多效唑对碗莲品种‘火花’叶片中可溶性蛋白质含量的影响见表3。由表3可以看出:质量浓度10~50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组碗莲品种‘火花’叶片中可溶性蛋白质含量均在6月30日达到最高值。随着多效唑质量浓度(0~40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)提高,各处理时

间叶片中可溶性蛋白质含量总体呈逐渐升高的趋势。6月10日,质量浓度10、20、30、40和50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中可溶性蛋白质含量均显著高于对照组,分别较对照组升高了24.68%、43.80%、81.07%、108.89%和127.56%,且各多效唑处理组间差异显著。

表3 不同质量浓度多效唑对碗莲叶片中可溶性蛋白质含量的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 3 Effects of paclobutrazol with different mass concentrations on soluble protein content in leaves of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

多效唑质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Mass concentration of paclobutrazol	不同处理时间(MM-DD)叶片中可溶性蛋白质含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ Soluble protein content in leaves at different treatment times (MM-DD)					
	06-10	06-20	06-30	07-10	07-20	07-30
0	15.64±1.77f	14.78±1.67c	18.08±1.41c	17.69±0.96e	20.95±1.15c	20.14±0.38c
10	19.50±0.84e	23.71±0.13b	25.03±1.34b	20.54±0.59d	20.63±0.45c	20.63±0.45c
20	22.49±0.65d	26.13±0.22b	28.28±2.49b	24.92±1.12c	21.16±0.92c	21.56±1.60c
30	28.32±0.49c	30.68±1.41a	33.72±0.30a	27.78±0.21b	24.28±0.35b	23.42±1.05bc
40	32.67±2.18b	33.24±1.21a	34.13±2.14a	30.02±0.71a	28.90±1.34a	27.04±1.30a
50	35.59±0.71a	30.63±0.77a	36.69±0.74a	26.93±0.58b	24.93±1.40b	26.18±1.15ab

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示在0.05水平上差异显著 Different lowercases in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

2.2.3 对叶片中抗氧化酶活性的影响 不同质量浓度多效唑对碗莲品种‘火花’叶片中抗氧化酶活性的影响见表4。

2.2.3.1 对叶片中超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响 由表4可以看出:随着处理时间延长,质量浓度10~50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组碗莲品种‘火花’叶片中SOD活性均呈先升高后降低的变化趋势,且均于6月30日达到最高值。质量浓度10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中SOD活性在各处理时间总体上较对照组显著升高。6月30日至7月30日,质量浓度10~50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中SOD活性均高于对照组。

2.2.3.2 对叶片中过氧化物酶(POD)活性的影响 由表4还可以看出:质量浓度10~50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组碗莲品种‘火花’叶片中POD活性在各处理时间均高于对照组。质量浓度10和20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中POD活性均于7月10日达到最高值;质量浓度30、40和50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中POD活性均于7月20日达到最高值;对照组叶片中POD活性于6月30日达到最高值。6月10日和7月10日,质量浓度10~50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中POD活性均显著高于对照组;而6月30日,各多效唑处理组及对照组叶片中POD活性均无显著差异。

表4 不同质量浓度多效唑对碗莲品种‘火花’叶片中抗氧化酶活性的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 4 Effects of paclobutrazol with different mass concentrations on antioxidant enzyme activities in leaves of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

多效唑质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Mass concentration of paclobutrazol	不同处理时间(MM-DD)叶片中超氧化物歧化酶活性/ $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$ Superoxide dismutase activity in leaves at different treatment times (MM-DD)					
	06-10	06-20	06-30	07-10	07-20	07-30
0	6.83±0.14c	10.09±1.07b	14.09±0.97b	9.24±1.27b	7.70±0.24d	7.95±0.08d
10	8.53±0.29b	13.62±0.22a	17.48±1.19ab	14.65±0.32a	11.63±0.65ab	10.79±0.29ab
20	6.66±0.31c	8.76±0.26b	17.24±2.46ab	13.02±0.42ab	12.94±0.04a	11.15±0.37a
30	10.64±0.25a	13.42±0.38a	17.92±1.27ab	12.70±1.17ab	10.43±0.06bc	10.28±0.41b
40	5.13±1.17d	8.73±0.04b	16.85±0.24ab	12.65±2.74ab	8.79±0.25cd	8.19±0.09d
50	7.11±0.17c	9.61±0.58b	19.50±1.86a	14.18±1.54a	10.13±1.20bc	9.26±0.15c

多效唑质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Mass concentration of paclobutrazol	不同处理时间(MM-DD)叶片中过氧化物酶活性/ $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$ Peroxidase activity in leaves at different treatment times (MM-DD)					
	06-10	06-20	06-30	07-10	07-20	07-30
0	8.82±0.86d	13.22±1.27b	19.37±1.90a	10.25±0.38e	12.72±2.20b	14.60±1.45c
10	13.99±0.30c	14.11±1.20b	22.33±3.74a	27.98±2.36a	24.78±2.15a	26.33±1.62a
20	20.48±0.29b	22.79±2.64a	20.85±1.12a	23.13±0.82bc	15.54±0.42b	17.47±2.62bc
30	21.57±0.12b	20.32±1.76a	23.82±0.24a	21.21±1.97c	29.78±1.30a	19.18±1.37b
40	24.76±1.02a	23.72±0.67a	20.56±2.95a	25.12±0.93ab	27.37±2.66a	26.36±1.72a
50	21.81±2.17b	23.30±0.52a	22.92±2.61a	17.03±3.64d	26.99±2.43a	16.86±2.12bc

多效唑质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Mass concentration of paclobutrazol	不同处理时间(MM-DD)叶片中过氧化氢酶活性/ $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$ Catalase activity in leaves at different treatment times (MM-DD)					
	06-10	06-20	06-30	07-10	07-20	07-30
0	3.58±0.43e	10.47±0.12b	8.11±0.02b	8.36±0.15a	9.97±1.26a	5.86±1.01a
10	10.46±0.41c	18.19±0.19a	7.72±0.66b	6.39±0.04bc	3.82±0.55b	2.78±0.17b
20	7.68±0.32d	9.22±0.05c	10.07±0.06a	6.32±0.44c	5.19±0.11b	3.91±0.35b
30	7.54±0.23d	10.52±0.19b	10.44±0.01a	7.39±0.28b	5.57±0.70b	4.16±0.52b
40	12.13±0.69b	10.56±0.22b	10.27±0.34a	6.56±0.04bc	3.78±0.70b	2.83±0.19b
50	14.76±1.23a	10.45±0.28b	9.51±0.08a	6.82±0.66bc	1.47±0.21c	1.18±0.14c

多效唑质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Mass concentration of paclobutrazol	不同处理时间(MM-DD)叶片中多酚氧化酶活性/ $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$ Polyphenol oxidase activity in leaves at different treatment times (MM-DD)					
	06-10	06-20	06-30	07-10	07-20	07-30
0	1.52±0.61a	2.72±0.25d	2.62±0.08c	5.62±0.82b	2.86±0.13a	1.58±0.45bc
10	1.60±0.46a	3.61±0.25b	4.80±0.27a	9.79±1.31a	2.60±0.33abc	1.88±0.44b
20	0.53±0.05b	1.28±0.22e	3.36±0.20b	3.89±1.21b	1.88±0.36bcd	1.77±0.28b
30	0.66±0.08b	3.19±0.06c	2.70±0.21c	2.76±0.67b	1.44±0.46d	3.39±0.18a
40	0.60±0.29b	1.20±0.27e	0.50±0.01d	3.07±1.40b	1.81±0.21cd	3.84±0.21a
50	0.24±0.09b	4.64±0.10a	0.77±0.04d	2.93±0.64b	2.68±0.44ab	1.09±0.23c

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示在0.05水平上差异显著 Different lowercases in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

2.2.3.3 对叶片中过氧化氢酶(CAT)活性的影响
由表4还可以看出:随着处理时间延长,质量浓度10、20和30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组碗莲品种‘火花’叶片中CAT活性先升高后降低,分别于6月20日、6月30日和6月20日达到最高值;质量浓度40和50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中CAT活性则逐渐降低。6月10日、6月20日和6月30日,质量浓度10~50

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中CAT活性总体上高于对照组,其中,6月10日,质量浓度10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中CAT活性较对照组显著升高;而7月10日、7月20日和7月30日,各多效唑处理组叶片中CAT活性均显著低于对照组。

2.2.3.4 对叶片中多酚氧化酶(PPO)活性的影响
由表4还可以看出:随着处理时间延长,质量浓度

10 和 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组及对照组碗莲品种‘火花’叶片中 PPO 活性总体上呈先升高后降低的变化趋势,且均于 7 月 10 日达到最高值,且显著高于对照组;质量浓度 30 和 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片中 PPO 活性则均于 7 月 30 日达到最高值,且显著高于对照组;质量浓度 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组叶片 PPO 活性的最高值出现最早,于 6 月 20 日达到最高值,也显著高于对照组。

2.3 不同质量浓度多效唑处理组碗莲品种‘火花’生长指标和叶片中部分生理指标的隶属函数值分析

不同质量浓度多效唑处理组碗莲品种‘火花’生长指标和叶片中部分生理指标的隶属函数值见表 5。

由表 5 可以看出:随着多效唑质量浓度提高,碗莲品种‘火花’的总隶属函数值呈逐渐增加的趋势,其中,立叶长、立叶宽、立叶高、花径、花高和开花总数的隶属函数值的变化趋势与总隶属函数值的变化趋势一致。对照组(质量浓度 0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑)的总隶属函数值最小,为 1.463;质量浓度 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组的总隶属函数值最大,达到 10.279;质量浓度 30 和 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组的总隶属函数值较高,分别为 8.224 和 8.460;质量浓度 10 和 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 多效唑处理组的总隶属函数值较小,分别为 6.227 和 6.775。

表 5 不同质量浓度多效唑处理组碗莲品种‘火花’生长指标和叶片中部分生理指标的隶属函数值¹⁾

Table 5 Subordinate function values of growth indexes and some physiological indexes of leaves of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) in paclobutrazol treatment groups with different mass concentrations¹⁾

MCP	各指标的隶属函数值 Subordinate function value of each index													TSFV
	SLN	SLL	SLW	SLH	FD	FH	TFN	MDA	SP	SOD	POD	CAT	PPO	
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.323	0.006	0.010	0.000	0.547	0.577	1.463
10	0.259	0.511	0.657	0.426	0.423	0.426	0.149	0.523	0.225	0.819	0.630	0.378	0.801	6.227
20	0.500	0.772	0.735	0.508	0.538	0.508	0.349	0.689	0.394	0.598	0.519	0.375	0.270	6.755
30	0.444	0.946	0.765	0.623	0.654	0.656	0.400	0.650	0.679	0.763	0.747	0.524	0.373	8.224
40	0.556	0.978	0.794	0.803	0.923	0.689	0.499	0.503	0.953	0.241	0.827	0.432	0.262	8.460
50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.555	0.834	0.559	0.664	0.340	0.327	10.279

¹⁾ MCP: 多效唑质量浓度 Mass concentration of paclobutrazol ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); SLN: 立叶数 Standing leaf number; SLL: 立叶长 Standing leaf length; SLW: 立叶宽 Standing leaf width; SLH: 立叶高 Standing leaf height; FD: 花径 Flower diameter; FH: 花高 Flower height; TFN: 开花总数 Total flower number; MDA: 叶片中丙二醛含量 Malondialdehyde content in leaf; SP: 叶片中可溶性蛋白质含量 Soluble protein content in leaf; SOD: 叶片中超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity in leaf; POD: 叶片中过氧化物酶活性 Peroxidase activity in leaf; CAT: 叶片中过氧化氢酶活性 Catalase activity in leaf; PPO: 叶片中多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase activity in leaf; TSFV: 总隶属函数值 Total subordinate function value.

2.4 碗莲品种‘火花’生长指标和叶片中部分生理指标的隶属函数值的相关性分析

碗莲品种‘火花’生长指标和叶片中部分生理指标的隶属函数值的相关系数见表 6。由表 6 可以看出:碗莲品种‘火花’生长指标(包括立叶数、立叶长、立叶宽、立叶高、花径、花高和开花总数)的隶属函数值与总隶属函数值均在 0.05 或 0.01 水平上呈显著正相关;叶片中可溶性蛋白质含量和过氧化物酶(POD)活性的隶属函数值分别与总隶属函数值在 0.05 水平上呈显著负相关和显著正相关,其他生理指标的隶属函数值与总隶属函数值的相关性均不显著。立叶数、立叶长、立叶宽、立叶高、花径、花高和开花总数的隶属函数值之间总体上在 0.05 或 0.01 水平上呈显著正相关。叶片中丙二醛(MDA)含量的隶属函数值与生长指标和叶片中其他生理指标的隶属

函数值的相关性均不显著。叶片中 MDA 含量、可溶性蛋白质含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和 POD 活性的隶属函数值与生长指标的隶属函数值均呈正相关,其中,叶片中可溶性蛋白质含量和 POD 活性的隶属函数值与生长指标的隶属函数值的相关性总体上达显著水平;而叶片中过氧化氢酶(CAT)活性和多酚氧化酶(PPO)活性的隶属函数值与生长指标的隶属函数值均呈负相关,但相关性不显著。叶片中 MDA 含量、可溶性蛋白质含量和 POD 活性的隶属函数值与 CAT 活性和 PPO 活性的隶属函数值间以及 SOD 活性的隶属函数值与 CAT 活性的隶属函数值间均呈负相关,但相关性均不显著。上述结果显示:碗莲品种‘火花’的生长指标以及叶片中可溶性蛋白质含量和 POD 活性可以作为判断其矮化效果的可靠、简易指标。

表6 碗莲品种‘火花’生长指标和叶片中部分生理指标的隶属函数值的相关系数¹⁾Table 6 Correlation coefficients of subordinate function values of growth indexes and some physiological indexes of leaves of cultivar ‘Huohua’ of bowl lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.)¹⁾

指标 Index	各指标隶属函数值间的相关系数 Correlation coefficients among subordinate function values of different indexes													
	S _{SLN}	S _{SLL}	S _{SLW}	S _{SLH}	S _{FD}	S _{FH}	S _{TFN}	S _{MDA}	S _{SP}	S _{SOD}	S _{POD}	S _{CAT}	S _{PPO}	TSFV
S _{SLN}	1.000													
S _{SLL}	0.844*	1.000												
S _{SLW}	0.881*	0.950**	1.000											
S _{SLH}	0.947**	0.939**	0.943**	1.000										
S _{FD}	0.916*	0.949**	0.926**	0.993**	1.000									
S _{FH}	0.959**	0.935**	0.954**	0.989**	0.967**	1.000								
S _{TFN}	0.985**	0.790	0.810	0.924**	0.891*	0.936**	1.000							
S _{MDA}	0.521	0.744	0.752	0.544	0.528	0.599	0.399	1.000						
S _{SP}	0.814*	0.920**	0.812*	0.928**	0.958**	0.887*	0.814*	0.437	1.000					
S _{SOD}	0.322	0.492	0.639*	0.383	0.325	0.469	0.223	0.766	0.162	1.000				
S _{POD}	0.651	0.915*	0.903*	0.844*	0.863*	0.824*	0.583	0.663	0.827*	0.602	1.000			
S _{CAT}	-0.673	-0.478	-0.697	-0.607	-0.566	-0.606	-0.567	-0.433	-0.320	-0.452	-0.462	1.000		
S _{PPO}	-0.619	-0.666	-0.476	-0.583	-0.625	-0.553	-0.605	-0.463	-0.711	0.159	-0.369	0.112	1.000	
TSFV	0.902*	0.975**	0.979**	0.979**	0.970**	0.983**	0.861*	0.673	-0.903*	0.535	0.909*	-0.577	-0.547	1.000

¹⁾S_{SLN}: 立叶数的隶属函数值 Subordinate function value of standing leaf number; S_{SLL}: 立叶长的隶属函数值 Subordinate function value of standing leaf length; S_{SLW}: 立叶宽的隶属函数值 Subordinate function value of standing leaf width; S_{SLH}: 立叶高的隶属函数值 Subordinate function value of standing leaf height; S_{FD}: 花径的隶属函数值 Subordinate function value of flower diameter; S_{FH}: 花高的隶属函数值 Subordinate function value of flower height; S_{TFN}: 开花总数的隶属函数值 Subordinate function value of total flower number; S_{MDA}: 叶片中丙二醛含量的隶属函数值 Subordinate function value of malondialdehyde content in leaf; S_{SP}: 叶片中可溶性蛋白质含量的隶属函数值 Subordinate function value of soluble protein content in leaf; S_{SOD}: 叶片中超氧化物歧化酶活性的隶属函数值 Subordinate function value of superoxide dismutase activity in leaf; S_{POD}: 叶片中过氧化物酶活性的隶属函数值 Subordinate function value of peroxidase activity in leaf; S_{CAT}: 叶片中过氧化氢酶活性的隶属函数值 Subordinate function value of catalase activity in leaf; S_{PPO}: 叶片中多酚氧化酶活性的隶属函数值 Subordinate function value of polyphenol oxidase activity in leaf; TSFV: 总隶属函数值 Total subordinate function value. * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 * and ** indicate the significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论和结论

生长延缓剂可延缓植物生长,提高观赏性,在花卉种植上应用广泛^[8-12]。已有研究表明:水仙(*Narcissus tazetta* var. *chinensis* M. Roem.)^[4]、月季(*Rosa chinensis* Jacq.)^[13]、紫竹〔*Phyllostachys nigra* (Lodd. ex Lindl.) Munro〕^[14]和桂花品种‘日香桂’(*Osmanthus fragrans* ‘Rixiang Gui’)^[15]等植物在生长延缓剂的作用下,叶片数量减少,株高降低。本研究中,不同质量浓度多效唑处理组碗莲品种‘火花’的生长受到不同程度抑制。随着多效唑质量浓度提高,碗莲品种‘火花’的立叶和花有矮化趋势。质量浓度 10、20 和 30 mg · L⁻¹多效唑处理组的立叶长、立叶宽、立叶高、花径和花高均较对照组(质量浓度 0 mg · L⁻¹多效唑)显著降低,开花总数低于对照组,但 3 个处理组间差异不显著,表现为株高降低、株型饱满、花型花色正常,观赏价值提高;而质量浓度 50 mg · L⁻¹多效唑处理组的开花总数均显著减少,观赏性变差。随多效唑质量浓度的提高,碗莲品种‘火

花’立叶数明显减少,说明多效唑抑制其营养生长,导致新叶萌发减少,长势减弱。

丙二醛(MDA)含量是衡量膜脂过氧化作用的重要指标,MDA 含量过高可引起细胞膜不同程度的损伤,从而破坏其生理机能^[16]。随着处理时间延长,质量浓度 10 和 50 mg · L⁻¹多效唑处理组碗莲品种‘火花’叶片 MDA 含量呈“降低—升高—降低”的变化趋势,均于 7 月 10 日达到最高值。推测可能由于多效唑处理初期,叶片中可溶性蛋白质含量升高,缓解了碗莲叶片膜脂过氧化作用,MDA 含量降低;而随着处理时间延长,可溶性蛋白质含量降低,渗透势增加,导致叶片膜脂过氧化加剧,MDA 含量升高。

可溶性蛋白质可以通过调节渗透势减轻植物受到的逆境伤害,其含量代表植物总体代谢水平,含量越高表明叶片生理活性越强^[16-17]。甄红丽等^[18]对大丽花(*Dahlia pinnata* Cav.)及宋海凤等^[19]对紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)的研究结果表明:施用多效唑可显著提高可溶性蛋白质的含量。本研究中,高质量浓度(40 和 50 mg · L⁻¹)多效唑处理组碗莲叶片中可溶性蛋白质含量总体上高于其他多效唑处理组。

胁迫条件下,植物的酶活性显著升高^[20]。本研究中,随着处理时间延长,质量浓度 10~50 mg·L⁻¹多效唑处理组碗莲品种‘火花’叶片中超氧化物歧化酶(SOD)活性以及质量浓度 10、20 和 30 mg·L⁻¹多效唑处理组叶片中过氧化氢酶(CAT)活性均呈先升高后降低的变化趋势,说明多效唑对碗莲品种‘火花’造成了一定的伤害,多效唑处理初期叶片中抗氧化酶活性的升高有助于减轻活性氧等有害物质对细胞膜的伤害;随着处理时间延长,叶片中抗氧化酶活性开始降低,说明抗氧化酶的合成受到破坏,抗氧化酶对碗莲的保护作用开始减弱。此外,质量浓度 40 和 50 mg·L⁻¹多效唑处理组叶片中 CAT 活性则呈逐渐降低的变化趋势,而质量浓度 10~50 mg·L⁻¹多效唑处理组叶片中过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活性的变化趋势各异,其原因有待进一步研究。7月10日,质量浓度 10 和 50 mg·L⁻¹多效唑处理组叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性与对照组差异显著,其中,SOD 和 POD 活性显著升高,CAT 活性显著降低。

相关性分析结果显示:碗莲品种‘火花’生长指标的隶属函数值间以及叶片中可溶性蛋白质含量和 POD 活性的隶属函数值与生长指标的隶属函数值间总体在 0.05 或 0.01 水平上显著相关,因此,生长指标以及叶片中可溶性蛋白质含量和 POD 活性可以作为判断碗莲品种‘火花’矮化效果的可靠、简易指标。

综上所述,质量浓度 10、20 和 30 mg·L⁻¹多效唑处理组碗莲品种‘火花’立叶和花变矮,开花总数无显著差异,观赏性提高;质量浓度 50 mg·L⁻¹多效唑处理组的开花总数急剧减少,观赏性明显降低。说明适宜浓度的多效唑处理可有效控制碗莲品种‘火花’生长,提高其观赏性。

参考文献:

- [1] 丁跃生,童兆琴.碗莲[M].南京:江苏科学技术出版社,1992: 7-8.
- [2] 王其超,张行言.中国荷花品种图志[M].北京:中国林业出版社,2005: 61-62.
- [3] 刘静雅,李绍才,孙海龙,等.多效唑对紫穗槐生长及生理特性的影响[J].植物科学学报,2016,34(2): 271-279.
- [4] 范晓芬,苏振洪,李水根,等.不同温度条件下多效唑对崇明水仙生长的影响[J].上海交通大学学报(农业科学版),2015,33(2): 60-65.
- [5] 姜英,彭彦,李志辉,等.多效唑、烯效唑和矮壮素对金钱树的矮化效应[J].园艺学报,2010,37(5): 823-828.
- [6] 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.
- [7] YANG C P, FUJITA S, ASHRAFUZZAMAN M, et al. Purification and characterization of polyphenol oxidase from banana (*Musa sapientum* L.) pulp[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48: 2732-2735.
- [8] BURROW G E, BOAG T S, STEWART W P. Changes in leaf, stem, and root anatomy of *Chrysanthemum* cv. Lillian Hoek following paclobutrazol application[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 1992, 11: 189-194.
- [9] 崔志伟,王康才,郑晖.多效唑和缩节胺对现蕾前忍冬枝叶生长及花蕾性状和有效成分含量的影响[J].植物资源与环境学报,2014,23(1): 99-103, 112.
- [10] 孙纪霞,王丽辉,刘学卿,等.蝴蝶兰叶片内源激素对植物生长延缓剂的响应[J].中国农业大学学报,2013,18(5): 77-82.
- [11] KRUG B A, WHIPKER B E, MCCALL I, et al. Comparison of flurprimidol to ancymidol, paclobutrazol, and uniconazole for tulip height control[J]. Horttechnology, 2005, 15: 370-373.
- [12] KRUG B A, WHIPKER B E, MCCALL I, et al. Comparison of flurprimidol to ethephon, paclobutrazol, and uniconazole for hyacinth height control[J]. Horttechnology, 2005, 15: 872-874.
- [13] 武荣花,李勇,王升,等.植物生长延缓剂对盆栽月季生长发育的影响[J].西北植物学报,2012,32(4): 767-773.
- [14] 赵海燕,刘桂华,岳祥华,等.两种植物生长延缓剂对紫竹的矮化效应[J].江西农业大学学报,2013,35(4): 786-790.
- [15] 王萍,杨秀莲,王春君,等.两种植物生长延缓剂对盆栽日香桂的矮化效应[J].南京林业大学学报(自然科学版),2014,38(S1): 30-34.
- [16] 韩冰,徐刚,郭世荣,等.不同浓度盐胁迫对黄瓜幼苗生长和生理代谢的影响[J].江苏农业学报,2014,30(1): 172-177.
- [17] HUA S, ZHANG Y, YU H, et al. Paclobutrazol application effects on plant height, seed yield and carbohydrate metabolism in canola [J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2014, 16: 471-479.
- [18] 甄红丽,苑兆和,冯立娟,等.多效唑对大丽花生理特性的影响[J].中国农学通报,2012,28(1): 153-157.
- [19] 宋海凤,李绍才,孙海龙,等.根施不同浓度多效唑对紫穗槐生长特性和相关生理指标的影响[J].植物生理学报,2015,51(9): 1495-1501.
- [20] 张家洋.重金属及盐胁迫对绿金合果芋生理特性的影响[J].浙江农业学报,2016,28(4): 601-608.

(责任编辑:张明霞)