

引用格式: 刘佳苗, 唐红, 朱佳辰, 等. 3 种生长调节剂对紫斑牡丹开花及枝条生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(12): 1837-1847.
[LIU J M, TANG H, ZHU J C, et al. Effects of three kinds of growth regulators on flowering and branch physiological characteristics of *Paeonia rockii*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(12): 1837-1847.] DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.20240486

3 种生长调节剂对紫斑牡丹开花及 枝条生理特性的影响

刘佳苗¹, 唐红^{1*}, 朱佳辰², 陶宣霖¹, 薛娜娜¹

(1 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2 甘肃农业大学 资源与环境学院, 兰州 730070)

摘要 【目的】探讨 3 种生长调节剂处理对紫斑牡丹开花及枝条生理特性的影响, 为其开花性状化学调控提供理论依据。【方法】以甘肃省兰州市榆中县官滩沟紫斑牡丹培育基地的‘象牙白’为材料, 在花芽分化前分别叶面喷施 100, 300, 500 mg/L 的 IAA、GA₃ 和 6-BA, 以清水为对照, 考察植株盛花期开花情况以及枝条抗氧化酶活性和渗透调节物质含量等生理指标变化。【结果】与对照相比, 3 种生长调节剂均能不同程度增加紫斑牡丹开花数和重瓣率, 且 500 mg/L 6-BA 处理效果最好, 其单、重瓣花枝条的 SOD、POD 活性及脯氨酸含量也最高。紫斑牡丹枝条中 SOD、POD 和 CAT 活性与植株开花数和重瓣率均呈正相关, 在开花过程中发挥着不可忽视的作用, 并以 SOD 表现更为突出。3 种生长调节剂处理紫斑牡丹开花数、重瓣率及枝条各项生理指标分别在 500 mg/L 6-BA、500 mg/L GA₃ 及 300 mg/L GA₃ 处理下表现最佳。【结论】3 种生长调节剂均通过枝条生理指标直接或间接促进增加紫斑牡丹开花数和雄蕊瓣化程度, 但促进程度存在差异, 其中以 500 mg/L 6-BA 处理的开花数和重瓣率增幅最大。

关键词 生长调节剂; 紫斑牡丹; 开花; 雄蕊瓣化; 生理特性

中图分类号 Q945.79; S685.11 **文献标志码** A

Effects of three kinds of growth regulators on flowering and branch physiological characteristics of *Paeonia rockii*

LIU Jiamiao¹, TANG Hong^{1*}, ZHU Jiachen², TAO Xuanlin¹, XUE Nana¹

(1 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract [Objective] The study aims to explore the effects of three kinds of growth regulators on the flowering and branch physiological characteristics of *Paeonia rockii* and to provide theoretical basis for the chemical regulation of flowering traits of *P. rockii*. [Methods] With ‘Xiangyabai’ from Guantangou *P. rockii* Cultivation Base in Yuzhong County, Lanzhou City, Gansu Province as the material, three kinds of growth regulators (IAA, GA₃, and 6-BA) at concentrations of 100, 300 and 500 mg/L were sprayed on the leaves before flower bud differentiation, with water as the control. The changes of physiological indexes, including flowering at full-bloom stage, antioxidant enzyme activity, and osmotic adjustment substance content of branches, were investigated. [Results] Compared with the control, the three growth regulators increased the number of flowers and the rate of double-petal flowers to varying degrees, and the effect of 500 mg/L 6-BA treatment was the best. The SOD activity, POD activity, and Pro content of the

收稿日期: 2024-09-02; 修改稿收到日期: 2024-10-18

基金项目: 甘肃省牡丹工程研究中心项目(XZ20181120); 甘肃省科技厅甘肃省科技支撑计划项目(1604NKCA053)

作者简介: 刘佳苗(2000-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事园林植物与观赏园艺研究。E-mail: 1027848544@qq.com

* 通信作者: 唐红, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事园林观赏植物遗传育种研究。E-mail: tangh@gsau.edu.cn

single-petal branches and double-petal branches were the highest. The activities of SOD, POD, and CAT in the branches of *P. rockii* were positively correlated with the number of flowers and the rate of double-petal flowers, which played an important role in the flowering process, with SOD was more prominent. The number of flowers, rate of double-petal flowers, and physiological indexes of the branches were the best under the treatment of 500 mg/L 6-BA, 500 mg/L GA₃, and 300 mg/L GA₃, respectively. [Conclusion] The three growth regulators directly or indirectly increased flowering number and stamen petaling degree of *P. rockii* through the physiological indexes of the branches, but there were differences in the degree of promotion, among which the number of flowering and the rate of double petaling of the 500 mg/L 6-BA treatment increased the most.

Key words growth regulator; *Paeonia rockii*; flowering; stamen petalization; physiological characteristics

紫斑牡丹(*Paeonia rockii*)又名甘肃牡丹、西北牡丹,是毛茛科(Ranunculaceae)芍药属(*Paeonia* L.)多年生宿根落叶灌木,是中国珍贵的花卉种质资源,花瓣呈红、粉、白等颜色,上有深紫色斑点,因此得名紫斑牡丹。牡丹作为中国传统园艺植物中的瑰宝之一,以其华丽的花朵和悠久的历史而备受瞩目。其株形优美,花朵硕大,花色艳丽,雍容华贵,具有较高的观赏价值,独特的花瓣形态和多元化的花色赋予园林美化和文化传承方面的地位。再者,牡丹花朵有不同瓣化程度多种形态,其中重瓣型的花朵更加饱满美丽^[1],在园林植物观赏中更受青睐。紫斑牡丹种群是由野生的单瓣花经过不断自然进化,具有以雄蕊瓣化为主的半重瓣、重瓣、极重瓣等丰富的花型,且在同株紫斑牡丹上可表现出多种花型^[2]。

紫斑牡丹重瓣花起源的主要方式之一为雄蕊瓣化,具体是指雄蕊失去花药并扁化扩大或雄蕊上端扩大转变为花瓣状的过程^[3]。在植物生长发育过程中存在诸多因素影响未来开花的形态,前人研究表明:基因^[4]、生长调节剂^[5]、温度^[6]、光照、水分^[7]等因素都会对植物成花造成影响。目前,关于花朵发生雄蕊瓣化的原因研究多集中在转录组分析和关键基因挖掘上^[8],前人关于除基因外其他因素是否对雄蕊瓣化产生影响只做了简单的研究,在研究中发现雄蕊瓣化与生长调节剂间存在密不可分的联系^[9]。

在生长调节剂中,生长素(IAA)能够促进植物生长和蛋白质合成,同时对花发育有促进作用^[10]。赤霉素(GA₃)具有促进细胞分裂和伸长、诱导开花及可能促进花发育成畸形的作用^[11]。6-苄氨基腺嘌呤(6-BA)具有促进植物细胞分裂、诱导植物花芽形成的作用^[12]。花朵的畸形化程度在一定条件下受植株生长调节剂的影响。例如,康乃馨‘White Sim’在生长素和赤霉素分别处理后出现花瓣增多现象^[13];月季(*Rosa chinensis*)在开花第1年重瓣花少而不稳定,在2~3年后花轮增加而且更加稳定,这似乎受到生长

调节剂的影响^[14]。同时,生长调节剂除了对雄蕊瓣化产生影响外,还会对开花数量及品质产生影响。例如,不同生长调节剂处理会对迷你蝴蝶兰(Miniature *Phalaenopsis*)花苞数量产生影响^[5];‘绿莹’石斛(*Dendrobium* ‘Lüying’)开花株数和开花率在不同生长调节剂处理间差异显著^[15];不同浓度 GA₃ 和 6-BA 也会影响企剑白墨(*Cymbidium sinense* ‘Qijian Baimo’)开花数量及品质^[16]。另外,前人还研究了生长调节剂对其他种类植物开花的影响,并探讨其抗氧化酶活性、渗透调节物质及丙二醛含量变化。花器官作为异养器官,依赖于糖类碳水化合物提供充足的能量以保障其正常发育,在开花过程中碳水化合物的积累和分配对开花品质具有决定性作用,可溶性蛋白会参与花器官的形成,而渗透调节物质则能在一定程度上缓解外界不良环境对植株造成的伤害。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)可以清除活性氧自由基,控制脂质过氧化和保护细胞膜系统免受损害,酶活性高低也会影响开花花期;MDA含量作为细胞膜损伤的标志物,也与花朵自然衰败有关,高MDA含量会促进植株衰败^[17-19]。因此,观测植物以上生理生化指标的变化不仅可以了解生长调节剂通过调控植株体内哪些生理指标来间接影响开花性状,而且可以了解生长调节剂是否会使植株抗逆性发生变化。

目前,国内对紫斑牡丹的研究多集中在繁育^[20]、油用性能^[21]、栽培^[22]、遗传^[23]、花粉活力^[24]等方面,但在其开花性状及观赏性提升方面研究较少,喷施生长调节剂对其开花和生理特征的影响更是鲜有报道。紫斑牡丹作为一种园林景观常用植物,提高其开花数和瓣化程度对增加其观赏性具有重要意义。因此,本试验以紫斑牡丹‘象牙白’为研究对象,考察不同浓度生长素、赤霉素和6-苄氨基腺嘌呤对紫斑牡丹开花数、重瓣率及生理特性的影响,筛选出可有效增加紫斑牡丹开花数和雄蕊瓣化的外源物质及其最适浓

度,并结合不同处理下开花指标和生理指标的变化趋势分析 2 种指标间相关性和贡献率,以期为紫斑牡丹开花性状的化学调控提供理论依据,也为提升紫斑牡丹园林景观观赏价值奠定研究基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料选用紫斑牡丹品种‘象牙白’,种植于甘肃省兰州市榆中县官滩沟紫斑牡丹培育基地,其植株生长环境一致,生长健壮、无病虫害、年龄相近,且开花情况基本一致。

1.2 试验设计

试验采取随机试验设计,2023 年 6 月上旬盛花期进行试验材料的挑选、挂牌及开花情况记录。次年,在试验材料花芽分化前开始喷施生长调节剂处理,生长调节剂的选择及浓度设置参考张娇^[19]、张瑞等^[25]的试验并进行预实验,最后筛选出的生长调节剂分别是 IAA(A)、GA₃(B)和 6-BA(C),均设置 100(1),300(2),500(3) mg/L 3 个浓度水平,共组成 9 个处理,分别表示为 A₁、A₂、…、C₂、C₃,用清水处理作对照组(CK),每组处理设置 3 个重复。由于生长调节剂易见光分解,因此选择在 19:00 喷施,所用生长调节剂均现用现配,每个处理 3 株,用喷壶整株喷洒保证叶面和叶背喷洒均匀,每隔 7 d 喷 1 次,共处理 3 次。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 开花指标

生长调节剂处理前先统计预选试验样本在盛花期的开花数与重瓣率,从中挑选出长势和开花情况基本一致的紫斑牡丹作为正式实验样本,次年于生长调节剂处理后在植株盛花期再次统计样本开花情况,分别记录植株的总开花数、单瓣花数与重瓣花数,计算重瓣率(重瓣花数/总开花数),每个处理记录 3 株。

1.3.2 枝条抗氧化酶活性

在植株达到盛花期时采集试验材料,分别挑选靠近植株顶端的单瓣花和重瓣花各 3 朵,剪取花朵生长点以下枝条 10 cm,同一处理下选取 3 株作为重复,迅速分类编号后用锡纸包裹并放入液氮罐中速冻,带回实验室后转移至-80℃超低温冰箱保存用于后续测定抗氧化酶活性。SOD 活性采用氮蓝四唑法测定,POD 活性采用愈创木酚法测定,CAT 活性采用紫外分光光度计法测定^[26-27]。称取 0.5 g 枝条样品,加入相应抗氧化酶活性测定提取液,在预冷的研钵中研磨成匀浆,4℃下离心 20 min,上清液

为粗酶液,分别加入对应反应溶液,SOD 活性测定时需要 1 支暗中对管管和 3 支光下对照管,加完反应溶液立即对暗中对管管进行遮光处理,其他测定管与光下对照管在 3 000~4 000 lx 下光照 15~20 min,温度控制在 25~35℃之间,以暗中对管管调零,光下对照管为对照,测定 560 nm 处吸光值并计算 SOD 活性;POD 和 CAT 活性均是在加完反应溶液后用分光光度计分别在波长 470 nm 和 240 nm 下测定 2 min 吸光度变化,最后分别计算 POD 和 CAT 活性。测定指标时每个处理均进行 3 次重复。

1.3.3 枝条渗透调节物质和丙二醛含量

采用与抗氧化酶活性测定相同的枝条取样方法。可溶性糖(SS)含量测定用蒽酮比色法,先称取 0.2 g 枝条样品剪碎混匀加入 5 mL 提取液沸水浴 30 min,将上清液过滤至 25 mL 容量瓶中,重复提取 2 次,最后定容至 25 mL,取过滤后溶液加入反应试剂沸水浴 10 min,在波长 620 nm 下测定吸光值,从标准曲线中计算 SS 含量;可溶性蛋白(SP)含量测定采用考马斯亮蓝染色法,称取枝条样品 0.5 g 加入 10 mL 提取液,在预冷的研钵中研磨成匀浆,4℃下 5 000 r/min 离心 10 min,取上清液加反应试剂,放置 2 min 后在波长 595 nm 下记录吸光值,用标准曲线计算 SP 含量;脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮水杨酸法测定,称取 0.5 g 枝条样品,加入 6 mL 提取液研磨至匀浆,沸水浴 10 min 后于 4℃下 3 000 r/min 离心 10 min,取上清液加入反应试剂,在波长 520 nm 下测定吸光值,用标准曲线计算 Pro 含量;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定,称取 0.2 g 枝条样品加入 5 mL 提取液研磨、离心提取上清液,在上清液中加入反应试剂,沸水浴 15 min,分别测波长 450,532,600 nm 下吸光值,计算 MDA 含量^[26-27]。测定指标时每个处理均进行 3 次重复。

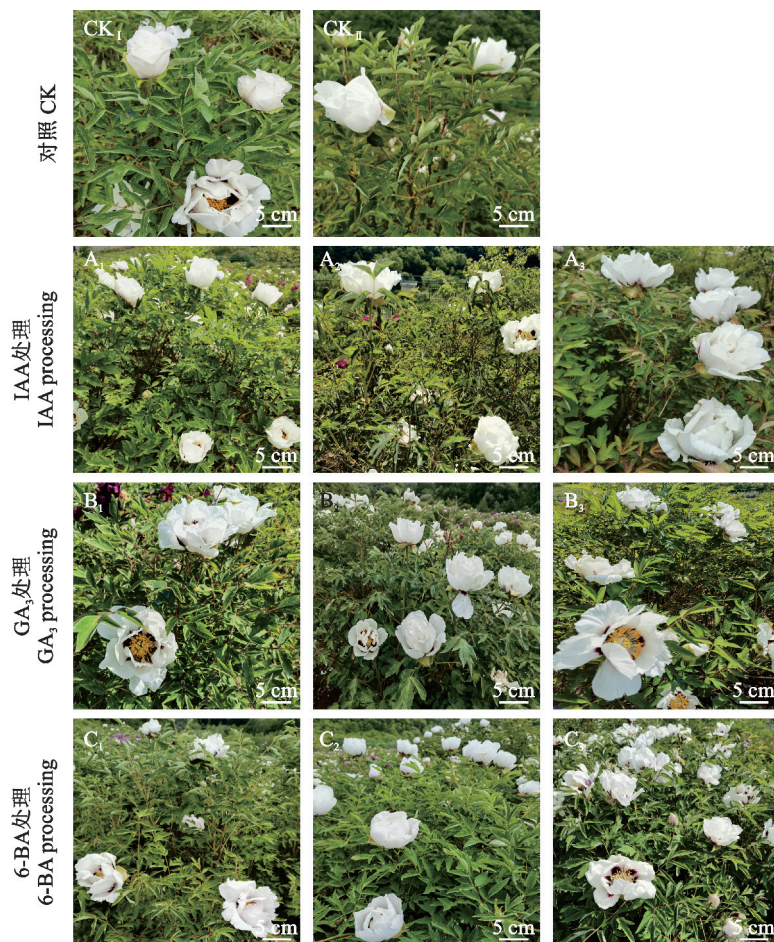
1.4 数据分析

所有数据均采用 Excel 2019 软件整理和汇总,用 SPSS 27.0 软件进行差异显著性分析、通径分析、相关性分析及主成分分析,用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 生长调节剂对紫斑牡丹开花性状的影响

喷施不同浓度 IAA、GA₃ 和 6-BA 后,紫斑牡丹开花情况表现不尽相同(图 1),并且开花数和重瓣率发生显著变化(表 1)。表 1 表明,生长调节剂处理前(2023 年)试验样本间开花数和重瓣率差异性不大,在处理(2024 年)出现明显变化。



CK 为对照(无生长调节剂处理, I、II 分别表示 2023 年和 2024 年), A、B、C 分别表示生长调节剂 IAA、 GA_3 和 6-BA, 而 1、2、3 分别表示 100、300、500 mg/L 浓度。下同。

图 1 3 种生长调节剂处理下紫斑牡丹开花情况

CK is control (without hormonal treatments, I and II denote in 2023 and in 2024, respectively), A, B, and C stand for growth regulators IAA, GA_3 , and 6-BA, while 1, 2, and 3 stand for concentrations of 100, 300, and 500 mg/L, respectively. The same as below.

Fig. 1 Flowering of *P. rockii* under treatments of three growth regulators

表 1 3 种生长调节剂处理下紫斑牡丹开花性状

Table 1 The flowering traits of *P. rockii* under treatments of three growth regulators

| 处理 Treatment | 总开花数 Total number of flowers | | 重瓣率 Rate of the double-petal flower/% | |
|-----------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
| | 处理前 Before treatment | 处理后 After treatment | 处理前 Before treatment | 处理后 After treatment |
| CK | 45.33±1.53a | 41.67±1.53g | 0.53±0.02b | 0.49±0.02f |
| A ₁ | 43.67±0.58a | 53.67±2.08cd | 0.52±0.02b | 0.66±0.04bc |
| A ₂ | 45.33±1.15a | 46.67±1.53f | 0.52±0.02b | 0.55±0.02e |
| A ₃ | 44.67±1.53a | 51.67±2.08de | 0.54±0.03ab | 0.65±0.01cd |
| B ₁ | 44.00±2.65a | 49.33±1.53e | 0.56±0.05ab | 0.65±0.02cd |
| B ₂ | 45.67±1.53a | 57.67±1.53b | 0.50±0.03b | 0.66±0.02bc |
| B ₃ | 45.67±1.53a | 54.33±2.52c | 0.59±0.02a | 0.71±0.01a |
| C ₁ | 43.33±1.53a | 46.67±1.15f | 0.55±0.04ab | 0.61±0.03d |
| C ₂ | 43.33±2.31a | 57.67±1.53b | 0.52±0.02b | 0.69±0.03b |
| C ₃ | 45.67±1.15a | 62.67±1.15a | 0.53±0.02ab | 0.73±0.01a |

注: 同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

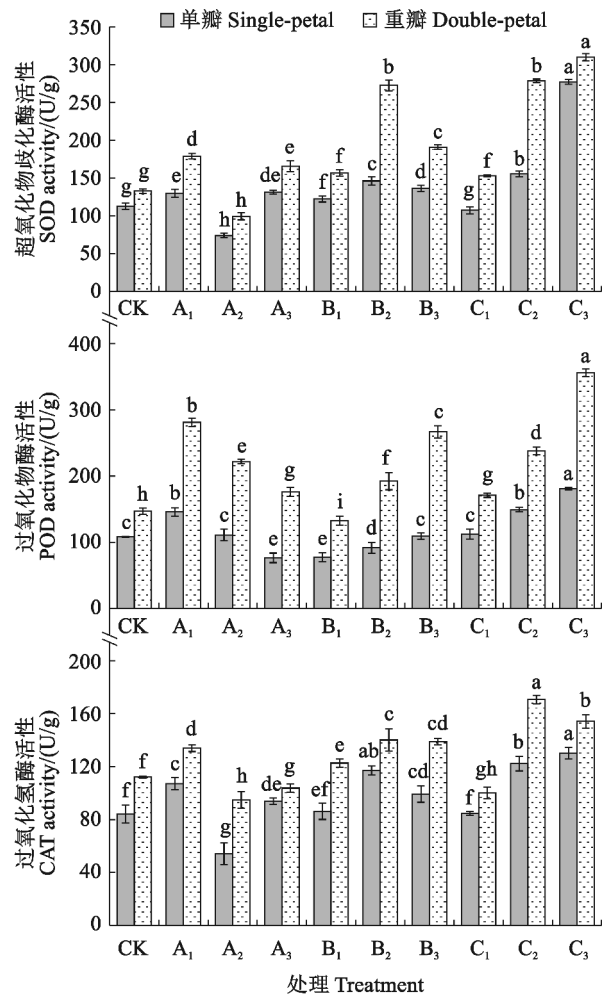
Notes: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments at 0.05 level ($P < 0.05$). The same as below.

通过处理前后(表 1)比较发现,紫斑牡丹 CK 植株开花数和重瓣率在第 2 年有所下降,而喷施生长调节剂植株在处理后的总开花数和重瓣率均有不同程度增加。其中,与 CK 相比,IAA 处理植株开花数和重瓣率有明显的增加,并表现为 $A_1 > A_3 > A_2$, A_1 处理的开花数和重瓣率分别显著增加 28.80% 和 34.69% ($P < 0.05$); GA_3 处理植株开花数表现为 $B_2 > B_3 > B_1$, 重瓣率则表现为 $B_3 > B_2 > B_1$, 最高处理植株总开花数和重瓣率分别比 CK 显著增加 38.40% 和 44.90%; 6-BA 处理植株开花数和重瓣率均表现为 $C_3 > C_2 > C_1$, 且各浓度处理间均差异显著, C_3 处理分别比 CK 显著增加 50.40% 和 48.98%。可见,各生长调节剂处理对紫斑牡丹开花性状整体提升效果表现为 6-BA $>$ $GA_3 >$ IAA, 并以 500 mg/L 6-BA 处理植株开花数增幅及重瓣率提升效果最好; 同时,各生长调节剂处理开花数和重瓣率促进效果最佳的浓度差异较大,6-BA 均为 500 mg/L, GA_3 分别为 300, 500 mg/L, IAA 均为 100 mg/L。

2.2 生长调节剂对紫斑牡丹单重瓣花枝条抗氧化酶活性的影响

紫斑牡丹单、重瓣花枝条的 3 种抗氧化酶活性在各生长调节剂处理后均与 CK 存在显著差异 ($P < 0.05$), 且重瓣花枝条酶活性均高于单瓣花枝条(图 2)。其中,在 IAA 处理下,单、重瓣花枝条的 SOD 和 CAT 活性均随处理液浓度升高先下降再上升,而 POD 活性则呈下降趋势,各处理大多与 CK 差异显著; 单瓣花枝条 SOD 活性以 A_3 处理最高, POD 和 CAT 活性均以 A_1 处理最高,它们分别比 CK 显著上升 15.59%、37.46% 和 27.15%; 重瓣花枝条 SOD、POD 及 CAT 活性均表现为 A_1 处理最高,分别比 CK 显著提升 34.75%、90.86% 和 19.38% ($P < 0.05$)。在 GA_3 处理下,随生长调节剂浓度升高,2 种枝条 SOD 和 CAT 活性均先上升再下降,POD 活性则持续上升,各处理也大多与 CK 差异显著; 单、重瓣花枝条 SOD 与 CAT 活性均以 B_2 处理最高,POD 活性则以 B_3 处理最高。随 6-BA 浓度升高,2 种枝条 SOD 与 POD 活性均呈逐渐上升趋势,单瓣花枝条 CAT 活性也呈逐渐上升趋势,而重瓣花枝条 CAT 活性先上升后下降,且在 300, 500 mg/L 浓度下均显著高于 CK; 单瓣花枝条 3 种酶活性均在 C_3 处理下最高,也显著高于其余生长调节剂处理,尤其是 SOD 活性较 CK 提升 145.89% ($P < 0.05$), 重瓣花枝条中 SOD 和 POD 活性均以 C_3 处理最高, CAT 活性以 C_2 处理最高,它们也显著高于其余生

长调节剂处理,尤其是 POD 活性较 CK 显著提升 142.23%。



单瓣花枝条或者重瓣花枝条内不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 2 生长调节剂处理下紫斑牡丹单重瓣花枝条 SOD、POD 和 CAT 活性

The different lowercase letters within single-petal branches or double-petal branches indicate significant difference between treatments at 0.05 level ($P < 0.05$). The same as below.

Fig. 2 The activities of SOD, POD, and CAT in branches of the single-petal flower and double-petal flower of *P. rockii* under growth regulator treatments

2.3 生长调节剂对紫斑牡丹单重瓣花枝条渗透调节物质及 MDA 含量的影响

在各浓度生长调节剂处理下,紫斑牡丹单、重瓣花枝条的 SS、SP、Pro 和 MDA 的含量与 CK 相比大多发生显著变化 ($P < 0.05$), 且重瓣花枝条含量均高于单瓣花枝条(图 3)。其中,在 IAA 处理下,单、重瓣花枝条 SS 含量随处理浓度增加先上升再下降, SP、Pro 和 MDA 含量则先下降再上升; 2 种枝条

SS 含量均在 A_2 处理下最高,而其 SP、Pro 和 MDA 含量均在 A_1 处理下最高。在 GA_3 处理下,随喷施浓度升高,单瓣花枝条 SS 含量逐渐下降,并以 B_1 处理最高,重瓣花枝条 SS 含量则先下降后上升,并在 B_3 处理下最高;单、重瓣花枝条 SP 含量随喷施浓度升高先上升后下降,而 Pro 和 MDA 含量则先下降再上升,SP 含量在 B_2 处理下最高,而 Pro 和 MDA 含量均在 B_3 处理下最高, B_2 处理单、重瓣花枝条

SP 含量比 CK 分别显著上升 67.45% 和 70.56% ($P < 0.05$)。在 6-BA 处理下,2 种枝条 SS、SP 和 MDA 含量随处理浓度升高均先下降再上升,Pro 含量则呈逐渐上升趋势;2 种枝条 SS、SP 和 Pro 含量均在 C_3 处理下最高,MDA 含量均在 C_1 处理下最高,最高值处理均与其他浓度处理差异显著,其中 C_1 处理单、重瓣花枝条 MDA 含量较 CK 分别显著上升了 56.64% 和 71.86% ($P < 0.05$)。

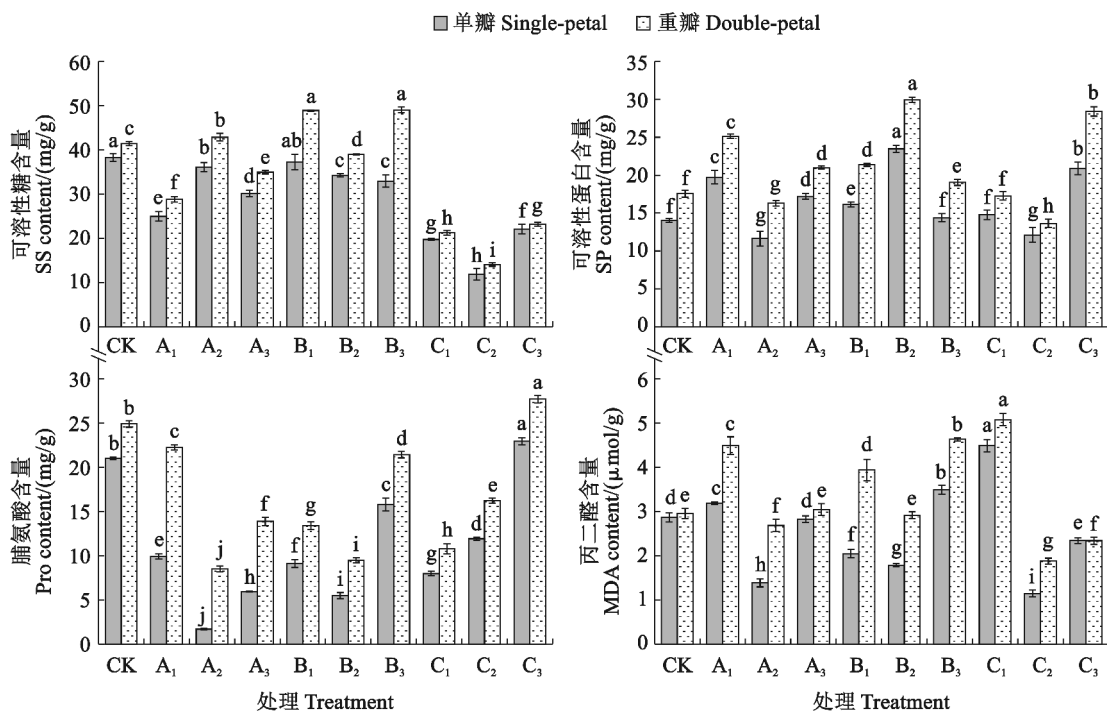


图 3 生长调节剂处理下紫斑牡丹单、重瓣花枝条 SS、SP、Pro 和 MDA 含量

Fig. 3 The contents of SS, SP, Pro, and MDA in branches of the single-petal flower and double-petal flower of *P. rockii* under growth regulator treatments

2.4 生长调节剂处理下紫斑牡丹枝条生理指标与开花性状的通径分析

通径分析可揭示各生理指标对开花性状的影响程度。直接通径系数绝对值大小表示其对开花数的直接贡献率,间接通径系数表明一个指标通过其他指标间接对开花数产生的影响,而决策系数则是表示该生理指标对开花数的影响力度。紫斑牡丹各枝条生理指标对开花性状通径分析结果(表 2)表明:7 个生理指标对开花数的影响程度(直接通径系数绝对值大小)为 $SOD > POD > Pro > CAT > SP > SS > MDA$,其决策系数排列为 $SOD > POD > CAT > MDA > SP > Pro > SS$,其通过其他指标响应紫斑牡丹开花数间接效应的大小是 $CAT > Pro > SS > SP > SOD > MDA > POD$ 。可见,SOD 活性的直接通径系数和决策系数均最大(分别为 0.557 和 0.706),它在生理指标中对

紫斑牡丹开花数的影响力度最大,POD 活性和 Pro 含量的影响程度次之,但 POD 和 CAT 活性通过 SOD 活性对总开花数产生的间接正效应较大。

紫斑牡丹枝条 7 个生理指标对雄蕊瓣化(花重瓣率)的影响程度为 $CAT > Pro > POD > MDA > SOD > SS > SP$,CAT、Pro 和 POD 的直接通径系数最大,它们对雄蕊瓣化贡献率最大。7 个生理指标的决策系数排列为 $Pro > MDA > CAT > SOD > POD > SP > SS$,其中 Pro 的决策系数最大(0.884)。7 个生理指标通过其他指标响应紫斑牡丹雄蕊瓣化间接效应的大小是 $Pro > SS > MDA > SP > SOD > POD > CAT$,其中的 SOD 通过 CAT 对雄蕊瓣化产生较大的间接正效应,间接通径系数为 0.520。

2.5 紫斑牡丹开花性状及生理指标综合性分析

通过对供试紫斑牡丹的各指标进行相关性分析

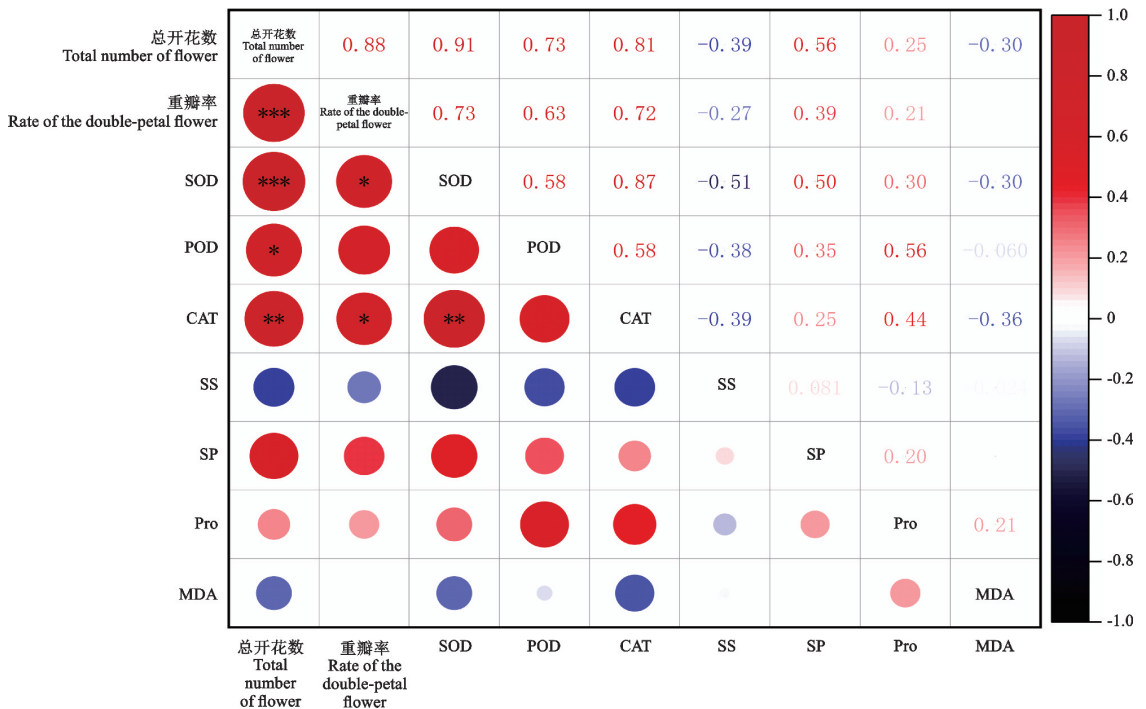
结果(图 4)表明:在生长调节剂的处理下,紫斑牡丹开花数和重瓣率与 SOD 活性呈极显著正相关关系($P < 0.001$),与 CAT 活性呈显著正相关关系($P <$

0.01),与 POD 活性呈显著正相关($P < 0.05$);SOD 与 CAT 活性呈显著正相关($P < 0.01$);重瓣率与 SOD 和 CAT 活性均呈显著正相关($P < 0.05$)。

表 2 紫斑牡丹开花数和雄蕊瓣化相关的生理指标途径分析

Table 2 Throughput analysis of the physiological indexes related to flowering and stamen petalody of *P. rockii*

| 开花性状 Flowering trait | 指标 Index | 相关系数 Correlation coefficient | 直接途径系数 Direct path coefficient | 间接途径系数 Indirect path coefficient | | | | | | | | 决定系数 R^2 |
|--|-------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|---------------|
| | | | | SOD | POD | CAT | SS | SP | Pro | MDA | 总和 Sum | |
| 总开花数 Total number of flowers | SOD | 0.912 | 0.557 | | 0.254 | 0.183 | -0.048 | 0.061 | -0.086 | -0.010 | 0.355 | 0.706 |
| | POD | 0.733 | 0.441 | 0.320 | | 0.122 | -0.035 | 0.043 | -0.157 | -0.002 | 0.292 | 0.452 |
| | CAT | 0.808 | 0.211 | 0.484 | 0.256 | | -0.036 | 0.030 | -0.124 | -0.012 | 0.598 | 0.297 |
| | SS | -0.395 | 0.093 | -0.285 | -0.166 | -0.082 | | 0.010 | 0.036 | -0.001 | -0.488 | -0.082 |
| | SP | 0.560 | 0.122 | 0.279 | 0.157 | 0.052 | 0.008 | | -0.056 | 0.000 | 0.438 | 0.122 |
| | Pro | 0.245 | -0.282 | 0.169 | 0.245 | 0.093 | -0.012 | 0.024 | | 0.007 | 0.527 | 0.036 |
| | MDA | -0.300 | 0.033 | -0.168 | -0.026 | -0.076 | -0.002 | -0.001 | -0.060 | | -0.334 | 0.274 |
| 重瓣率 Rate of the double-petal flower | SOD | 0.728 | 0.410 | | 0.284 | 0.520 | -0.162 | -0.033 | -0.150 | -0.141 | 0.317 | 0.428 |
| | POD | 0.631 | 0.494 | 0.236 | | 0.347 | -0.119 | -0.023 | -0.275 | -0.028 | 0.137 | 0.379 |
| | CAT | 0.716 | 0.598 | 0.356 | 0.287 | | -0.122 | -0.016 | -0.218 | -0.168 | 0.118 | 0.499 |
| | SS | -0.266 | 0.316 | -0.210 | -0.186 | -0.231 | | -0.005 | 0.062 | -0.011 | -0.582 | -0.268 |
| | SP | 0.386 | -0.066 | 0.205 | 0.175 | 0.148 | 0.026 | | -0.099 | -0.002 | 0.453 | -0.055 |
| | Pro | 0.215 | -0.495 | 0.125 | 0.275 | 0.264 | -0.040 | -0.013 | | 0.100 | 0.710 | 0.884 |
| | MDA | -0.014 | 0.468 | -0.124 | -0.030 | -0.215 | -0.008 | 0.000 | -0.106 | | -0.481 | 0.721 |



* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$ 。

图 4 紫斑牡丹不同生理指标相关性分析

* indicates $P < 0.05$, ** indicates $P < 0.01$, *** indicates $P < 0.001$.

Fig. 4 Correlation analysis of different physiological indexes of *P. rockii*

在 9 个指标中提取出 3 个主成分(表 3),第 1 主成分综合了总开花数、重瓣率、SOD、POD 和 CAT 活性指标信息,贡献率为 51.454%,第 2 主成分综合了脯氨酸和丙二醛含量指标信息,贡献率为 15.125%,第 3 主成分综合了可溶性糖和可溶性蛋白含量信息,

贡献率为 12.439%,三者累计贡献率为 79.018%。进一步从生长调节剂对紫斑牡丹开花影响综合性评价结果(表 4)可知,综合得分排名前 3 名的处理分别是 C₃、B₃ 和 B₂,即在 C₃ 处理(500 mg/L 6-BA)下紫斑牡丹各项指标最佳。

表 3 主成分分析旋转后的成分载荷矩阵

Table 3 Composition load matrix after PCA rotation

| 指标 Index | 第 1 主成分 PC1 | 第 2 主成分 PC2 | 第 3 主成分 PC3 |
|---|----------------|----------------|----------------|
| 总开花数 Total number of flowers | 0.980 | -0.058 | 0.072 |
| 重瓣率 Rate of the double-petal flower | 0.839 | 0.104 | 0.075 |
| 超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity | 0.943 | -0.074 | -0.073 |
| 过氧化物酶活性 Peroxidase activity | 0.759 | 0.374 | -0.062 |
| 过氧化氢酶活性 Catalase activity | 0.889 | -0.049 | -0.180 |
| 可溶性糖含量 Soluble sugar content | -0.439 | -0.112 | 0.753 |
| 可溶性蛋白含量 Soluble protein content | 0.528 | 0.128 | 0.706 |
| 脯氨酸含量 Proline content | 0.378 | 0.716 | -0.031 |
| 丙二醛含量 Malonaldehyde content | -0.313 | 0.811 | 0.025 |
| 特征值 Eigen value | 4.631 | 1.361 | 1.120 |
| 方差贡献率 Variance contribution rate/% | 51.454 | 15.125 | 12.439 |
| 累计贡献率 Cumulative contribution rate/% | 51.454 | 66.579 | 79.018 |

表 4 生长调节剂处理对紫斑牡丹影响综合性评价

Table 4 Comprehensive evaluation of the effect of growth regulators on *P. rockii*

| 处理 Treatment | 第 1 主成分 PC1 | 第 2 主成分 PC2 | 第 3 主成分 PC3 | 得分 Score | 排序 Ranking |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|---------------|
| CK | -1.294 | 0.715 | -0.202 | -0.738 | 9 |
| A ₁ | 0.327 | 1.076 | 0.162 | 0.443 | 4 |
| A ₂ | -1.030 | -1.135 | -0.020 | -0.890 | 10 |
| A ₃ | -0.422 | -0.079 | 0.221 | -0.255 | 6 |
| B ₁ | -0.461 | -0.822 | 0.922 | -0.312 | 7 |
| B ₂ | 0.733 | -1.276 | 1.344 | 0.444 | 3 |
| B ₃ | 0.282 | 0.942 | 0.596 | 0.457 | 2 |
| C ₁ | -0.956 | 0.804 | -1.030 | -0.631 | 8 |
| C ₂ | 1.051 | -1.156 | -2.185 | 0.120 | 5 |
| C ₃ | 1.770 | 0.929 | 0.193 | 1.360 | 1 |

3 讨论

3.1 紫斑牡丹开花数与雄蕊瓣化率对生长调节剂的响应特征

生长调节剂对植物开花的影响比较复杂,与生长调节剂种类、处理浓度、处理时间、植物生长状况

以及外界环境条件密切相关。IAA 具有促进植物生长和蛋白质合成等功能,GA₃ 可以促进细胞分裂和伸长以及诱导开花,6-BA 是人工合成的细胞分裂素,可以增加植株花序数量,提高出花率^[28]。有研究提出 IAA 对花发育有促进作用^[10],IAA 含量变化对花发育具有调控作用^[29]。张习敏等^[30]用 GA₃ 喷洒露珠杜鹃叶片,出现开花数增多的现象。黎维诗等^[31]研究发现喷洒 6-BA 后春石斛的花芽数和开花数量明显增多。本研究结果显示,不同浓度外源 IAA、GA₃ 和 6-BA 处理显著提升了紫斑牡丹的开花表现和雄蕊瓣化程度;对比处理前后 CK 开花性状,发现 CK 开花数与重瓣率在第 2 年有所下降,这或许与 2 年间的温度、光照和降水等外界环境因素存在差异有关;而生长调节剂处理后的大部分植株开花数量和重瓣率均高于对照,说明喷施生长调节剂可有效改善紫斑牡丹的开花性状和观赏性。各生长调节剂间相比较,IAA 处理组中浓度为 100 mg/L 时植株总开花数和重瓣率显著高于其他处理组和 CK;GA₃ 处理组中浓度为 300 mg/L 时植株开花数提升最为显著,而浓度为 500 mg/L 时重瓣率最高;6-BA 处理组表现最为突出,明显优于 IAA 和 GA₃ 处理组,而且在浓度为 500 mg/L 时总开花数和重

瓣率提升幅度最大。因此,在所有处理组中,500 mg/L 6-BA 显著提高了紫斑牡丹的开花数和重瓣率,表现出最佳的处理效果。这些结果说明喷施适宜浓度生长调节剂可以显著提升紫斑牡丹开花表现,为通过生长调节剂改进牡丹花卉生产提供了有力依据。

3.2 紫斑牡丹枝条的 3 种抗氧化酶对生长调节剂的响应特征

SOD、POD 和 CAT 是植物调节体内抗氧化清除系统的关键酶^[32]。SOD 能够歧化细胞内超氧离子自由基,将其歧化为 H_2O_2 和 O_2 ,POD 和 CAT 在催化作用下再将细胞内有害的 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2 ,从而减少和防御活性氧对细胞的损害,被认为是细胞膜的保护酶,对植物正常有序的代谢、细胞分化和生长发育具有重要作用^[33]。前人研究发现,外源 IAA 能使桑树抗氧化酶活性升高,且所有处理组都高于对照组^[34], GA_3 和 6-BA 能够增加香水百合体内抗氧化酶的活性水平^[35], GA_3 可提升菊花抗氧化酶活性^[18]。本研究结果表明,紫斑牡丹重瓣花枝条的抗氧化酶活性普遍高于单瓣花,且与 CK 相比,生长调节剂处理对紫斑牡丹枝条抗氧化酶活性产生不同程度的影响,3 种生长调节剂处理表现最好分别是 100 mg/L IAA、500 mg/L GA_3 和 500 mg/L 6-BA。在相关性分析中,紫斑牡丹枝条 SOD 活性与总开花数和重瓣率相关性最强($P < 0.001$),其次是 CAT 活性($P < 0.01$),最后为 POD 活性($P < 0.05$),且 SOD 活性与 CAT 活性有显著相关性($P < 0.01$),说明这 3 种抗氧化酶在提高紫斑牡丹开花数和重瓣率方面起着关键作用,且 SOD 与 CAT 在抗氧化反应中具有协同作用。主成分分析提取了三大主成分,其中第 1 主成分包括 SOD、POD 和 CAT 活性等指标,贡献率达到 61.312%,显示了这些抗氧化酶指标在综合评估开花特性中的重要性。在通径分析中,3 种抗氧化酶对紫斑牡丹开花数与重瓣率的直接通径系数和决策系数均排在前列,其中 SOD 活性对开花数影响的决策系数最大(0.706),证明抗氧化酶尤其是 SOD 对开花数和重瓣率的贡献较大。可见,喷施生长调节剂可显著影响紫斑牡丹指标中 3 种抗氧化酶活性,并且 3 种酶活性与紫斑牡丹开花性状具有极强的相关性。孔德政等^[36]研究也得出相似结果,即不同浓度的外源 IAA、 GA_3 和 6-BA 对碗莲的抗氧化酶活性产生明显影响,且不同生长调节剂种类、浓度及时间产生的

影响均不同,并以最大浓度的 6-BA 提升酶活性的效果较好。

3.3 紫斑牡丹渗透调节物质及丙二醛含量对生长调节剂的响应特征

植物开花是一个消耗能量的过程,伴随显著的生理指标变化。SS 和 SP 是植物体内重要的营养物质,它们的动态变化能反映植物的生长状态^[37]。SS 作为植物能量的载体,是碳水化合物运输的主要形式,其含量变化指示植物的碳素营养情况。SP 是氮代谢的最终产物,反映了氮代谢的活跃程度,为花器官的形成提供物质基础^[38]。此外,SS、SP 和 Pro 等渗透调节物质能够减轻植物在逆境胁迫下的损伤,Pro 含量常用来评估植物受损程度。MDA 含量反映膜脂过氧化程度,其高低指示了质膜的过氧化损伤程度^[39]。已有研究表明,喷施外源 GA_3 和 6-BA 能提升墨兰 SS 和 SP 的含量,但盛花期 SS 含量低于对照,这是由于生长调节剂会促进墨兰提前开花,更早到达花期所致^[16];生长调节剂处理下叠鞘石斛 SS 含量低于对照组,可能由于花芽分化消耗了大量 SS,但其 SP 含量仍会处于较高水平,并且当植物抗氧化酶活性降低的时候 MDA 含量会迅速上升,促进植物更快进入衰老,且效果在不同浓度存在差异^[24];生长调节剂处理下 Pro 浓度降低,并且因生长调节剂种类及浓度不同产生不同的效果^[40]。本研究结果表明,与 CK 相比,各生长调节剂处理组对紫斑牡丹枝条渗透调节物质(SS、SP 和 Pro)和 MDA 含量产生不同程度的影响,且重瓣花枝条的含量普遍高于单瓣花枝条;各生长调节剂处理组枝条 SS 含量最高的分别是 300 mg/L IAA、100 mg/L GA_3 和 300 mg/L 6-BA,SP 含量最高的分别是 100 mg/L IAA、300 mg/L GA_3 和 500 mg/L 6-BA,Pro 含量最高的分别是 100 mg/L IAA、500 mg/L GA_3 和 500 mg/L 6-BA,MDA 含量最高的分别是 100 mg/L IAA、500 mg/L GA_3 和 100 mg/L 6-BA 处理,各生理指标响应生长调节剂的最佳浓度不尽相同,总体上 100 mg/L IAA、500 mg/L GA_3 和 500 mg/L 6-BA 的处理效果较好,但大部分处理 SS 和 Pro 含量低于 CK,SP 和 MDA 含量高于 CK。通径分析结果显示,对于开花数和重瓣率,4 个指标中 Pro 含量的直接通径系数最大,表明它对开花和雄蕊瓣化贡献率最高,同时 Pro 含量也会通过 SOD 活性对开花数产生较大的间接效应。本研究结果与张娇^[19]的研究结果相似。

4 结 论

正常生长紫斑牡丹开花数在外界环境因素发生变化时会增多或减少,但生长调节剂对紫斑牡丹开花有显著促进作用,并以 500 mg/L 6-BA 处理的开花数和重瓣率提升幅度最大,且单、重瓣花枝条的 SOD 活性、POD 活性及 Pro 含量最高。不同生长调节剂对紫斑牡丹枝条各生理指标的影响程度存在

差异,并且通过这些指标变化直接或间接影响紫斑牡丹开花数和雄蕊瓣化程度。紫斑牡丹枝条中 3 种抗氧化酶在生长调节剂促进紫斑牡丹开花过程中发挥着不可忽视的作用,SOD、POD 和 CAT 活性与植株开花数和重瓣率均呈显著正相关。通过开花性状及生理指标综合性分析发现,紫斑牡丹开花数、重瓣率及枝条各项生理指标分别在 500 mg/L 6-BA、500 mg/L GA₃ 及 300 mg/L GA₃ 处理下表现较佳。

参考文献:

- [1] 蒲小燕. 紫斑牡丹繁殖方法探讨[J]. 现代农村科技, 2023(11): 47-48.
PU X Y. Discussion on the propagation method of *Paeonia rockii* [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(11): 47-48.
- [2] 张瑞, 唐红, 何丽霞. 同株紫斑牡丹中单瓣与重瓣花芽分化及内源激素含量比较[J]. 西北植物学报, 2022, 42(7): 1152-1160.
ZHANG R, TANG H, HE L X. Comparison of flower bud differentiation and endogenous hormone contents between single and double petals of *Paeonia rockii* from same plant [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(7): 1152-1160.
- [3] 赵印泉, 刘青林. 重瓣花的形成机理及遗传特性研究进展[J]. 西北植物学报, 2009, 29(4): 832-841.
ZHAO Y Q, LIU Q L. Research advances in the formation mechanism and genetic characteristics of double flowers [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(4): 832-841.
- [4] 杨龙姣, 路雪萍, 董伟杨, 等. 二穗短柄草 (*Brachypodium distachyon*) BdCO 基因调控开花的转录组学分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2024, 43(4): 602-615.
YANG L J, LU X P, TONG W Y, et al. Transcriptome analysis of the BdCO gene controlling flowering *Brachypodium distachyon* [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2024, 43(4): 602-615.
- [5] 何书奋, 罗金环, 符洁, 等. 外源激素对迷你型蝴蝶兰开花性状的影响[J]. 分子植物育种, 2023, 21(17): 5788-5793.
HE S F, LUO J H, FU J, et al. Effects of exogenous hormones on flowering traits of miniature *Phalaenopsis* [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(17): 5788-5793.
- [6] 李聪聪, 叶晓青, 邓衍明. 不同温度处理对双瓣茉莉开花的影响[J]. 北方园艺, 2018(4): 103-109.
LI C C, YE X Q, DENG Y M. Effects of different temperature treatments on flowering of *Jasminum sambac* [J]. *North-ern Horticulture*, 2018(4): 103-109.
- [7] 张艺腾, 龙硕, 吴薇, 等. 光照、水分和肥料对卡特树兰开花特性的影响[J]. 现代园艺, 2023, 46(15): 1-4, 8.
ZHANG Y T, LONG S, WU W, et al. Effects of light, water and fertilizer on flowering characteristics of *C. intermedia* var. *alba* × *Enc. atropurpureum* [J]. *Contemporary Horticulture*, 2023, 46(15): 1-4, 8.
- [8] 范永明. 芍药雄蕊瓣化关键基因挖掘及功能验证[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [9] 欧景莉, 黄雪梅, 胡艺帆, 等. 雄蕊瓣化形成机制研究进展

- [J]. 农业研究与应用, 2023, 36(1): 1-6.
OU J L, HUANG X M, HU Y F, et al. Research progress of stamen petaloidy formation mechanism [J]. *Agricultural Research and Application*, 2023, 36(1): 1-6.
- [10] 李天红, 黄卫东, 孟昭清. 苹果花芽孕育机理的探讨[J]. 植物生理学报, 1996(3): 251-257.
LI T H, HUANG W D, MENG Z Q. Study on the mechanism of flower bud formation in apple [J]. *Plant Physiology Journal*, 1996(3): 251-257.
- [11] 何文广. 赤霉素对山鸡椒花芽分化及花期调控研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
- [12] 张宁. 文冠果花芽分化及与内源激素关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [13] GARROD J F, HARRIS G P. Studies on the glasshouse carnation: Effects of temperature and growth substances on petal number [J]. *Annals of Botany*, 1974(5): 1025-1031.
- [14] NOMEROV B A. Change of the hybrid seedlings of roses by first and following flowerings [J]. *Vestnik. Seriia VI. Biologiya*, Pochvovedenie, 1974.
- [15] 龚建英, 王华新, 汪小玉, 等. 不同外源激素对‘绿莹’石斛萌芽及开花的影响[J]. 广西林业科学, 2021, 50(5): 551-556.
GONG J Y, WANG H X, WANG X Y, et al. Effects of different exogenous hormones on germination and flowering of *Dendrobium* ‘Lüying’ [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2021, 50(5): 551-556.
- [16] 李腾基, 付志惠, 陈鑫, 等. 不同植物生长调节剂对墨兰成花生理和开花性状的影响[J]. 分子植物育种, 2024, 22(17): 5777-5786.
LI T J, FU Z H, CHEN X, et al. Effects of different plant growth regulators on flowering physiology and flowering characters of *Cymbidium sinense* [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2024, 22(17): 5777-5786.
- [17] 陈睿, 鲜小林, 秦帆, 等. GA₃ 对杜鹃开花生理生化指标的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26(2): 554-558.
CHEN R, XIAN X L, QIN F, et al. Effects of GA₃ on physiological and biochemical indexes of *Rhododendron* blossom [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(2): 554-558.
- [18] 陈洪国, 马容明. GA₃ 对菊花开花和花瓣某些生理生化指标的影响[J]. 安徽农业科学, 2006(6): 1050-1051.
CHEN H G, MA R M. Effect of GA₃ on the flowering and some physiological indexes of chrysanthemum [J]. *Journal*

- of *Anhui Agricultural Sciences*, 2006(6): 1050-1051.
- [19] 张娇. 不同外源激素对叠鞘石斛开花及其相关性状的影响[D]. 成都:四川农业大学, 2020.
- [20] 贺欢, 杨馥霞, 汤玲, 等. 榆中半干旱地区紫斑牡丹繁育技术[J]. 西北园艺, 2023(9): 35-37.
HE H, YANG F X, TANG L, *et al.* Breeding technology of *Paeonia rockii* in semi-arid area of Yuzhong[J]. *Northwest Horticulture*, 2023(9): 35-37.
- [21] 张风云, 成雪峰, 张猛, 等. 油用牡丹效益调查与分析研究[J]. 菏泽学院学报, 2022, 44(5): 97-102.
ZHANG F Y, CHENG X F, ZHANG M, *et al.* Investigation and analysis on the benefits of oil-peony[J]. *Journal of Heze University*, 2022, 44(5): 97-102.
- [22] 王成元, 王霞. 紫斑牡丹的育苗和栽培技术措施分析[J]. 种子科技, 2023, 41(16): 84-86.
WANG C Y, WANG X. Analysis of seedling raising and cultivation techniques of *Paeonia rockii* [J]. *Seed Science & Technology*, 2023, 41(16): 84-86.
- [23] 卜英. 基于表型性状的栽培紫斑牡丹遗传多样性分析[J]. 河南农业, 2023(5): 7-9.
BU Y. Genetic diversity analysis of cultivated *Paeonia rockii* rubra based on phenotypic traits[J]. *Agriculture of He'nan*, 2023(5): 7-9.
- [24] 赵萍. 储存条件对单瓣和半重瓣紫斑牡丹花粉活力及生理特性的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2023.
- [25] 张瑞, 张双羽, 唐红, 等. 外源 GA₃ 对紫斑牡丹幼苗叶片解剖结构与光合特性及内源激素含量的影响[J]. 西北植物学报, 2021, 41(3): 450-460.
ZHANG R, ZHANG S Y, TANG H, *et al.* Anatomical structure, photosynthetic characteristics and endogenous hormones in leaves of *Paeonia rockii* seedlings under exogenous GA₃ treatment[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(3): 450-460.
- [26] 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: 134-170.
- [27] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 208-228.
- [28] NAMBIAR N, SIANG TC, MAHMOOD M. Effect of 6-benzy aminopurine on flowering of a *Dendrobium nobile* [J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2016(2): 225-231.
- [29] 严希, 彭剑涛. 生长素调节植物花发育的研究进展[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2015, 32(3): 32-38.
YAN X, PENG J T. Research progress of auxin regulating plant flower development[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2015, 32(3): 32-38.
- [30] 张习敏, 乙引, 杨骅, 等. 外源激素对露珠杜鹃花期调控的影响[J]. 北方园艺, 2009(4): 170-173.
ZHANG X M, YI Y, YANG H, *et al.* Effects of exogenous hormones on the regulation of flowering period in *Rhododendron hybridum* [J]. *Northern Horticulture*, 2009(4): 170-173.
- [31] 黎维诗, 柯海丽, 邓小果, 等. 6-BA 和 GA₃ 处理对春石斛催花的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(6): 1016-1019.
LI W S, KE H L, DENG X G, *et al.* Effects of 6-BA and GA₃ on *Dendrobium nobile*-type cultivar[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32(6): 1016-1019.
- [32] TOURAJZADEH O, PIRI H, NASERIN A. Effect of nano biochar addition and deficit irrigation on growth, physiology and water productivity of quinoa plants under salinity conditions[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2023(217): 105564.
- [33] 杨阳, 谭玉超, 常睿哲, 等. 外源硼对红地球葡萄幼苗生长及抗性相关指标的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(11): 120-127.
YANG Y, TAN Y C, CHANG R Z, *et al.* Effect of boron on growth and resistance related indicators of Red Globe grape seedlings[J]. *Journal of He'nan Agricultural Sciences*, 2020, 49(11): 120-127.
- [34] 马明月, 陈寒蕾, 孙佳佳, 等. IAA 处理对桑树嫩枝扦插生根形态、内源激素及酶活性的影响[J]. 河南科学, 2024, 42(9): 1265-1272.
MA M Y, CHEN H L, SUN J J, *et al.* Effects of IAA treatment on root morphology, endogenous hormone and enzyme activities in cuttings of mulberry[J]. *He'nan Science*, 2024, 42(9): 1265-1272.
- [35] 赵莉, 潘远智, 朱峤, 等. 6-BA、GA₃ 和 IBA 对香水百合叶绿素含量及抗氧化酶活性的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 248-256.
ZHAO L, PAN Y Z, ZHU Q, *et al.* Effects of 6-BA, GA₃ and IBA on photosynthetic pigment content and related enzyme activities of *Lilium casa blanca* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(5): 248-256.
- [36] 孔德政, 申雪莹, 孟伟芳, 等. 外源激素对碗莲开花及酶活性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(3): 79-82.
KONG D Z, SHEN X Y, MENG W F, *et al.* Effects of exogenous hormones on flowering and enzyme activity of bowl lotus[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(3): 79-82.
- [37] MA Y Y, ZHANG Y L, LU J, *et al.* Roles of plant soluble sugars and their response to plant cold stress[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2009, 8(10): 2004-2010.
- [38] 常钟阳, 张金政, 孙国峰, 等. 德国鸢尾‘常春黄’花芽分化的形态观察及 2 种代谢产物的动态变化[J]. 植物研究, 2008(6): 741-745.
CHANG Z Y, ZHANG J Z, SUN G F, *et al.* Morphological studies and changes of two metabolites content during floral bud differentiation period in *Iris germanica* cv. Lovely Again [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2008(6): 741-745.
- [39] 杨建霞, 毛宁, 张雪娟, 等. 沼液施用对干旱胁迫下玉米幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(8): 1323-1331.
YANG J X, MAO N, ZHANG X J, *et al.* Effects of biogas slurry application on physiological characteristics and growth of maize seedlings under drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(8): 1323-1331.
- [40] 高晓芬, 施艳萍, 张黎. 外源激素对蝴蝶兰光合生理与花芽分化的影响[J]. 北方园艺, 2024(13): 57-64.
GAO X F, SHI Y P, ZHANG L. Effects of exogenous hormones on photosynthetic physiology and flower bud differentiation in *Phalaenopsis* [J]. *Northern Horticulture*, 2024(13): 57-64.