

韩雪雪, 严 瑞. 外源激素对蝴蝶兰生理特性及花梗内源激素含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(5): 1038-1050.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.05.017

外源激素对蝴蝶兰生理特性及花梗内源激素含量的影响

韩雪雪, 严 瑞

(宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为明确外源 6-苄氨基嘌呤(6-BA)、赤霉素(GA_3)对蝴蝶兰品种甜格格生理特性及花梗内源激素含量的影响并筛选最佳外源激素处理含量,本研究共设 6 个处理,分别为喷施 100 mg/L 6-BA、150 mg/L 6-BA、200 mg/L 6-BA、100 mg/L GA_3 、150 mg/L GA_3 、200 mg/L GA_3 ,对照组(CK)喷施蒸馏水。对甜格格的生长指标、生理特性、光合及叶绿素荧光参数进行测定与对比,并分析最佳激素含量下蝴蝶兰花梗发育 3 个阶段内源激素含量的变化。结果表明,6-BA、 GA_3 可增加蝴蝶兰叶长和茎高,提高光化学淬灭系数(qP)、PS II 最大光能转换效率(F_v/F_m)、PS II 潜在光化学效率(F_v/F_o)、暗适应最大荧光产量(F_m)及表观电子传递速率(ETR),增强净光合速率(P_n),抑制非光化学淬灭系数(NPQ),且 6-BA 的整体处理效果优于 GA_3 ,其中,150 mg/L 6-BA 为最佳处理含量。在 150 mg/L 6-BA 处理下,蝴蝶兰花梗中内源激素含量随花梗发育呈动态变化。吲哚-3-乙酸(IAA)、茉莉酸(JA)、1-氨基环丙烷羧酸(ACC)主要作用于 S1 时期,6-苄氨基嘌呤、脱落酸(ABA)主要作用于 S2~S3 时期,不同时期激素含量差异较大,表明花梗发育过程受多种激素协同调控。本研究结果可为外源激素在蝴蝶兰栽培中的合理施用及对花梗生长的调控提供理论参考。

关键词: 蝴蝶兰; 外源激素; 生理机制; 内源激素

中图分类号: S682.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)05-1038-13

Impact of exogenous hormones on physiological properties and endogenous hormone content of pedicels in *Phalaenopsis* spp.

HAN Xuexue, YAN Rui

(College of Wine and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To clarify the effects of exogenous 6-benzylaminopurine (6-BA) and gibberellic acid (GA_3) on the physiological characteristics and endogenous hormone content in pedicels of the *Phalaenopsis* variety Tiangege, and to determine the optimal concentration of exogenous hormones, this study established six treatments, including spraying with 100 mg/L 6-BA, 150 mg/L 6-BA, 200 mg/L 6-BA, 100 mg/L GA_3 , 150 mg/L GA_3 , and 200 mg/L GA_3 , with a distilled water spray as the control (CK). Growth indices, physiological characteristics, photosynthetic parameters, and chlorophyll fluorescence parameters were measured and compared. Furthermore, changes in endogenous hormone levels during the three developmental stages of *Phalaenopsis* pedicels under the optimal hormone concentration were analyzed. The results demonstrated that both 6-BA and GA_3 promoted leaf length and stem height growth in *Phalaenopsis* spp., increased the photochemical quenching coefficient (qP), the maximum photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m), the potential photochemical efficiency of PS II (F_v/F_o), the maximum fluorescence yield of dark-adapted leaves (F_m), and the apparent electron transfer rate (ETR), enhanced the net

收稿日期: 2025-09-09

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2024AAC03353)

作者简介: 韩雪雪(2000-),女,甘肃平凉人,硕士研究生,主要从事菊花逆境生理研究。(E-mail) 17793638830@163.com

通讯作者: 严 瑞, (E-mail) yanrui2020@sina.cn

photosynthetic rate (P_n), and inhibited the non-photochemical quenching coefficient (NPQ). The treatment effects of 6-BA were generally better than that of GA_3 , with 150 mg/L 6-BA identified as the optimal hormone concentration. Under 150 mg/L 6-BA treatment, endogenous hormone levels in *Phalaenopsis* spp. pedicels exhibited dynamic changes as the pedicels developed. Indole-3-acetic acid (IAA), jasmonic acid (JA), and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) were primarily active during the S1 stage, while 6-BA and abscisic acid (ABA) were mainly active during the S2-S3 stages. Significant differences in hormone concentrations across these stages indicated that pedicels development was regulated by the synergistic action of multiple hormones. The findings of this study provide a theoretical reference for the rational application of exogenous hormones and the regulation of pedicels growth in *Phalaenopsis* spp..

Key words: *Phalaenopsis* spp.; exogenous hormone; physiological mechanism; endogenous hormone

蝴蝶兰 (*Phalaenopsis* spp.) 为兰科多年生植物, 适于高温高湿的环境。其花型优美雅致、色泽明艳丰富, 素有“洋兰皇后”之美誉^[1]。在国内外花卉市场中深受喜爱, 经济效益极高。然而西北地区深处内陆, 早春季节温度低、空气干燥, 蝴蝶兰设施栽培中常面临花期调控难、花梗发育不良的问题^[2]。

外源植物激素通常是指人工合成的、具备与内源激素相似功能的激素类化合物, 其应用十分广泛, 且已成为研究调节植株生长发育与调控花期、光合特性及内源激素含量等的重要手段。研究表明, 6-苄氨基嘌呤(6-BA) 能促进细胞分裂与分化, 诱导侧芽萌发并促进抽梗。赤霉素(GA_3) 则可促进细胞伸长, 增加花梗长度并加速成花。Wang 等^[3] 研究发现, 外源 6-BA 能显著促进菊花侧芽生长并增加侧枝数量; Yu 等^[4] 使用 GA_3 喷施处理拟南芥植株, 使其从营养生长转向生殖生长, 促进开花, 进而影响植株的发育进程。Li 等^[5] 发现, 在高温下喷施外源水杨酸(SA) 或 6-BA 有助于玉米叶片气孔开放, 增加叶面积指数, 提高净光合速率, 从而增加玉米的生物量。花梗的形成是蝴蝶兰从营养生长转向生殖生长的关键点, 是决定成花品质的关键因素之一。因此, 测定最佳外源激素含量下蝴蝶兰花梗不同时期的内源激素含量, 能够明确花梗发育时内源激素间的相互作用关系。目前, 关于植物内源激素对外源激素的响应在韭菜^[6]、牡丹^[7]、苹果^[8] 和水稻^[9] 等植物中均有报道。然而, 针对蝴蝶兰的研究多集中于单一外源激素对其开花时间或生长量的影响, 鲜有研究探究不同种类、不同含量外源激素对蝴蝶兰生长生理指标、光合作用及花梗内源激素含量的综合影响。基于此, 本研究拟以蝴蝶兰甜格格为材料, 通过施加不同含量的 6-BA、 GA_3 溶液, 测定其生长生理指标、光合和叶绿素荧光参数及内源激素含量, 旨在揭示不同含量 6-BA、 GA_3 对蝴蝶兰生长发育的调控效应与生理机制, 为蝴蝶兰高效栽

培提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以蝴蝶兰品种甜格格幼苗为试验材料(购自宁夏玉松旺园艺有限公司), 以水苔作为基质, 在日光温室中常规养护 12 个月。

1.2 试验设计

试验于宁夏银川兴庆区宁夏玉松旺园艺有限公司的日光温室内进行。将 6-BA、 GA_3 分别用少量乙醇溶解后, 用蒸馏水定容。共设 6 个处理, 分别喷施 100 mg/L 6-BA、150 mg/L 6-BA、200 mg/L 6-BA、100 mg/L GA_3 、150 mg/L GA_3 、200 mg/L GA_3 , 分别标记为 T1~T6, 对照组(CK) 喷施蒸馏水。每个处理 10 株, 重复 3 次。喷施于蝴蝶兰的茎基部和叶片, 每 7 d 喷施 1 次, 连续处理 4 次。通过测定蝴蝶兰的叶片数、叶长、叶宽、茎高、茎粗等指标, 筛选最佳外源激素含量及对应的花梗。选取健康的花梗, 在其长度为 0.5 cm (S1)、1.0 cm (S2) 和 3.0 cm (S3) 时, 采集样品, 速冻于 -80 °C 冰箱。每个时期重复 3 次。

1.3 试验指标的测定

1.3.1 蝴蝶兰幼苗生长指标的测定 统计各处理的蝴蝶兰叶片数, 使用卷尺测量叶长、叶宽、茎高, 使用游标卡尺测量茎粗。

叶长的测定: 植株自上而下第 2 片完全叶, 叶长为该叶片基部至叶尖的直线距离; 叶宽的测定: 植株自上而下第 2 片完全叶, 叶宽为该叶片的最大宽度; 茎高的测定: 茎高为靠近基质的叶基部与近基质的长度; 茎粗的测定: 茎粗为近土面主干直径。

1.3.2 蝴蝶兰幼苗生理指标的测定 叶片相对含水量的测定参考饱和称重法^[10]; 叶绿素含量的测定采用 95% 乙醇浸提法^[11]; 过氧化物酶(POD) 活性

的测定采用愈创木酚比色法^[12];过氧化氢酶(CAT)活性采用过氧化氢法^[13]测定;可溶性糖(SS)含量采用蒽酮比色法^[14]测定;可溶性蛋白(SP)含量采用考马斯亮蓝法^[15]测定。

1.3.3 蝴蝶兰幼苗光合气体交换与叶绿素荧光参数的测定 光合气体交换参数:利用便携式植物光合作用测定仪(型号:Li-6800,美国 Li-COR 公司产品)测定。于晴天上午9:00-11:00,随机选取中上部功能叶,测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)。试验重复 3 次。

叶绿素荧光参数的测定:利用调制式荧光测定仪(型号:PAM-2100,德国 WALZ 公司产品)测定叶绿素荧光参数。叶片暗适应 30 min,测定初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、最大光能转换效率(F_v/F_m)、光化学淬灭系数(qP)、非光化学淬灭系数(NPQ)及表观电子传递速率(ETR)。叶绿素荧光测定部位与光合测定部位相同。根据已测定数据,计算可变荧光(F_v)、PS II 潜在光化学效率(F_v/F_0)。

1.3.4 蝴蝶兰花梗中内源激素含量的测定 利用超高效液相色谱串联质谱法(UPLC-MS/MS)测定蝴蝶兰花梗中生长素类、赤霉素类、细胞分裂素类、水杨酸类、茉莉酸类、脱落酸及乙烯含量。每处理 3 次重复。参考刘万鹏等^[16]的方法进行测定,略有改进。

内源激素的提取:用液氮将样品迅速研磨成粉末,准确称取 50 mg,加入 10 μ L 内标混合溶液(100 ng/mL)和 1 mL 提取剂(甲醇:水:甲酸=15:4:1,体积比),涡旋 10 min,于 4 $^{\circ}C$ 、12 000 r/min 离心 5 min,取上清液浓缩,用 100 μ L 80% 甲醇-水复溶,过 0.22 μ m 滤膜,置于进样瓶中,上机待测。测定

条件:流动相 A 相,0.04% 乙酸-水溶液;B 相,0.04% 乙酸-乙腈溶液,流速 0.35 mL/min,柱温 40 $^{\circ}C$,进样量 2 μ L。质谱条件:电喷雾离子源(ESI)温度 550 $^{\circ}C$,正/负离子模式下质谱电压分别为 5 500 V 与 -4 500 V,气帘气压力 2.4×10^5 Pa。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2012 整理数据,利用 GraphPad Prism 9.1.2 制图,通过 SPSS 20.0 软件进行 Duncan's 多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同含量的 6-BA、GA₃ 处理对蝴蝶兰幼苗生长的影响

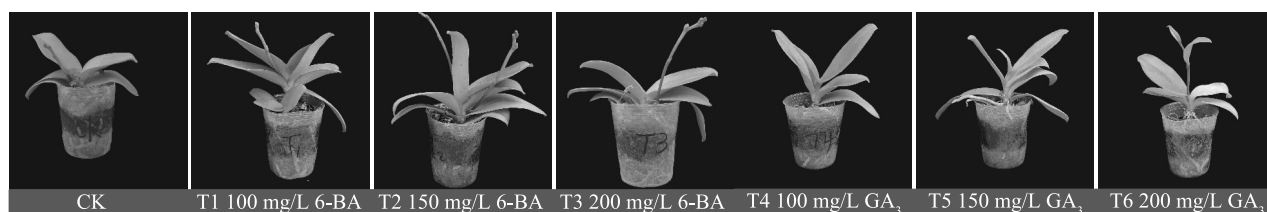
由表 1 可知,随着外源 6-BA 含量的增加,甜格格的叶片数、叶长、叶宽、茎粗整体呈先升后降的趋势,T2 处理时达到峰值,T2 处理叶片数、叶长、叶宽、茎粗与 CK 相比均达到显著差异($P < 0.05$),且与 CK 相比分别增加了 51.52%、17.82%、19.54%、17.81%。茎高则持续升高,T3 处理时达到最大值,为 CK 的 1.3 倍;随着外源 GA₃ 含量的增加,叶片数、叶长、叶宽、茎粗总体呈下降趋势,而茎高呈上升趋势。同时 T5、T6 处理叶片黄化,如图 1 所示。T6 处理叶宽、茎粗显著小于 CK ($P < 0.05$)。T6 处理时茎高达到最大值,为 CK 的 2.1 倍,与 CK 差异显著($P < 0.05$)。结果表明,6-BA 能有效促进甜格格的生长,T2 处理促进效果最佳;GA₃ 则抑制了叶宽、茎粗,但明显促进茎高的增加,且 T5、T6 处理的促进作用显著优于 6-BA。

表 1 不同含量 6-BA、GA₃ 对蝴蝶兰幼苗生长的影响

Table 1 Impacts of varying contents of 6-BA and GA₃ on the development of *Phalaenopsis* spp. seedlings

处理	叶片数 (张)	叶长 (cm)	叶宽 (cm)	茎高 (cm)	茎粗 (cm)
CK	6.60±1.15bc	10.10±0.28b	5.22±0.98b	2.16±0.28bc	1.46±0.15b
T1	8.30±1.52ab	10.50±0.96b	5.13±0.58b	2.33±0.57bc	1.35±0.48bc
T2	10.00±1.73a	11.90±0.40a	6.24±0.13a	2.50±0.11b	1.72±0.25a
T3	6.60±0.57bc	10.50±0.23b	5.23±0.23b	2.83±0.29b	1.17±0.19d
T4	6.90±1.52b	11.00±0.10ab	3.10±0.43cd	2.06±0.21c	1.30±0.36bc
T5	5.30±1.15c	10.60±1.05b	3.40±0.36c	4.50±0.35a	1.12±0.29d
T6	5.60±1.94c	10.30±0.31b	2.63±0.11d	4.53±0.43a	1.01±0.25d

CK(对照);喷施蒸馏水;T1~T6 分别表示喷施 100 mg/L 6-BA、150 mg/L 6-BA、200 mg/L 6-BA、100 mg/L GA₃、150 mg/L GA₃、200 mg/L GA₃。6-BA:6-氨基嘌呤;GA₃:赤霉素。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。



CK(对照):喷施蒸馏水;T1~T6 分别表示喷施 100 mg/L 6-BA、150 mg/L 6-BA、200 mg/L 6-BA、100 mg/L GA₃、150 mg/L GA₃、200 mg/L GA₃。6-BA:6-苄氨基嘌呤;GA₃:赤霉素。

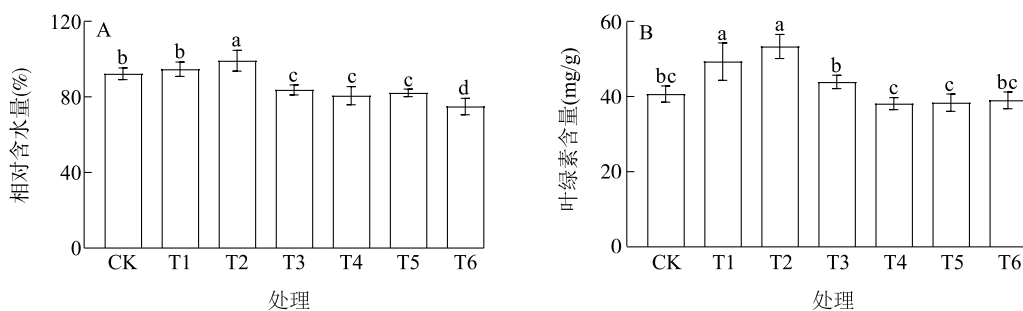
图1 不同含量的6-BA、GA₃对蝴蝶兰形态的影响

Fig.1 Impacts of varying contents of 6-BA and GA₃ on the morphology of *Phalaenopsis* spp.

2.2 不同含量的6-BA、GA₃处理对蝴蝶兰幼苗生理指标的影响

2.2.1 不同含量的6-BA、GA₃处理对蝴蝶兰幼苗相对含水量和叶绿素含量的影响 由图2可知,随着6-BA含量的增加,甜格格的相对含水量和叶绿素含量均呈先升后降的趋势。T2处理时,相对含水量和叶绿素含量均显著高于CK ($P<0.05$),分别为CK的1.07倍、1.31倍。T3处理时,相对含水量显著低

于CK ($P<0.05$),而叶绿素含量无显著变化;随着GA₃含量的增加,与CK相比较,相对含水量总体呈下降趋势,T6处理时达到最小,且显著低于CK ($P<0.05$),而叶绿素含量无显著变化。结果表明,150 mg/L 6-BA能显著提高甜格格的相对含水量,100~150 mg/L 6-BA能显著增加叶绿素含量,T2处理效果最佳;而GA₃显著抑制相对含水量,对叶绿素含量无明显影响。



CK(对照):喷施蒸馏水;T1~T6 分别表示喷施 100 mg/L 6-BA、150 mg/L 6-BA、200 mg/L 6-BA、100 mg/L GA₃、150 mg/L GA₃、200 mg/L GA₃。6-BA:6-苄氨基嘌呤;GA₃:赤霉素。不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图2 不同含量的6-BA、GA₃对蝴蝶兰幼苗相对含水量和叶绿素含量的影响

Fig.2 Impacts of 6-BA and GA₃ at varying contents on relative moisture content and chlorophyll content of *Phalaenopsis* spp. seedlings

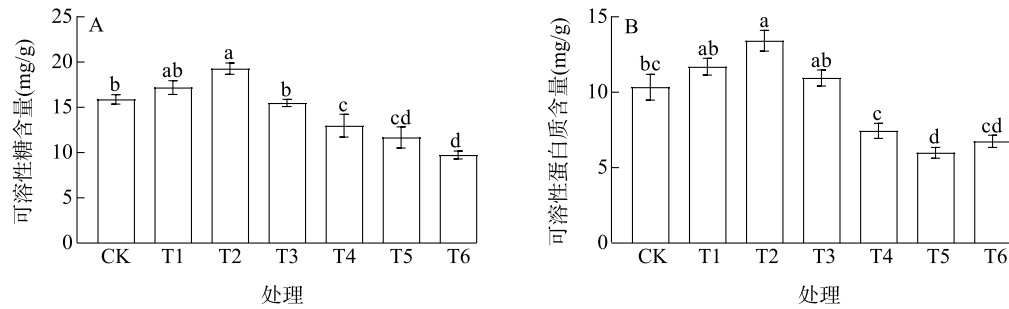
2.2.2 不同含量的6-BA、GA₃对蝴蝶兰幼苗可溶性糖和可溶性蛋白质含量的影响 由图3可知,随着6-BA含量的增加,甜格格的可溶性糖和可溶性蛋白质含量均呈先升后降的趋势,T2处理时达到最大值,且显著高于CK ($P<0.05$),较CK依次升高了21.40%、29.79%;随着GA₃含量的增加,可溶性糖含量呈下降趋势,T6处理时达到最小值,且T4~T6处理均显著低于CK ($P<0.05$)。随着GA₃含量的增加,可溶性蛋白质含量呈先降后升的趋势,T5处理时达到最小值,与CK差异显著。以上结果表明,

6-BA能明显增加甜格格的可溶性糖和可溶性蛋白质含量,T2处理时促进作用最佳;而GA₃降低了可溶性糖和可溶性蛋白质含量,其中T5处理效果显著。

2.2.3 不同含量的6-BA、GA₃对蝴蝶兰CAT、POD活性的影响 由图4可知,随着6-BA含量的增加,甜格格的CAT活性总体呈下降趋势,而POD活性呈先降后升的趋势,T2处理时均达到最小值,且均显著低于CK ($P<0.05$),较CK分别降低了19.15%、14.19%;随着GA₃含量的增加,甜格格的

CAT 活性和 *POD* 活性均呈上升趋势,但增幅不同。与 CK 相比较,T6 处理时,*CAT* 活性达到最大值,且显著高于 CK,较 CK 升高了 17.56%。而 T5 处理时,*POD* 活性达到最大值,较 CK 升高了 19.24%,且 T4~T6 处理均显著高于 CK ($P <$

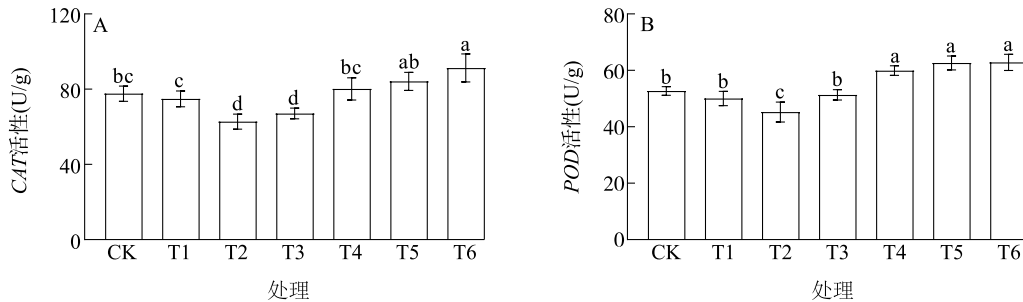
0.05)。结果表明,6-BA 对 *CAT* 活性具有抑制作用,且含量较低(T2 处理)时也能抑制 *POD* 活性。200 mg/L GA_3 (T6 处理)能显著提高 *CAT* 活性,T4~T6 处理均能显著提高 *POD* 活性。



CK(对照):喷施蒸馏水;T1~T6 分别表示喷施 100 mg/L 6-BA、150 mg/L 6-BA、200 mg/L 6-BA、100 mg/L GA_3 、150 mg/L GA_3 、200 mg/L GA_3 。6-BA:6-苄氨基嘌呤; GA_3 :赤霉素。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 3 不同含量的 6-BA、 GA_3 对蝴蝶兰幼苗可溶性糖和可溶性蛋白质含量的影响

Fig.3 Impacts of varying contents of 6-BA and GA_3 on soluble sugar and soluble protein contents of *Phalaenopsis* spp. seedlings



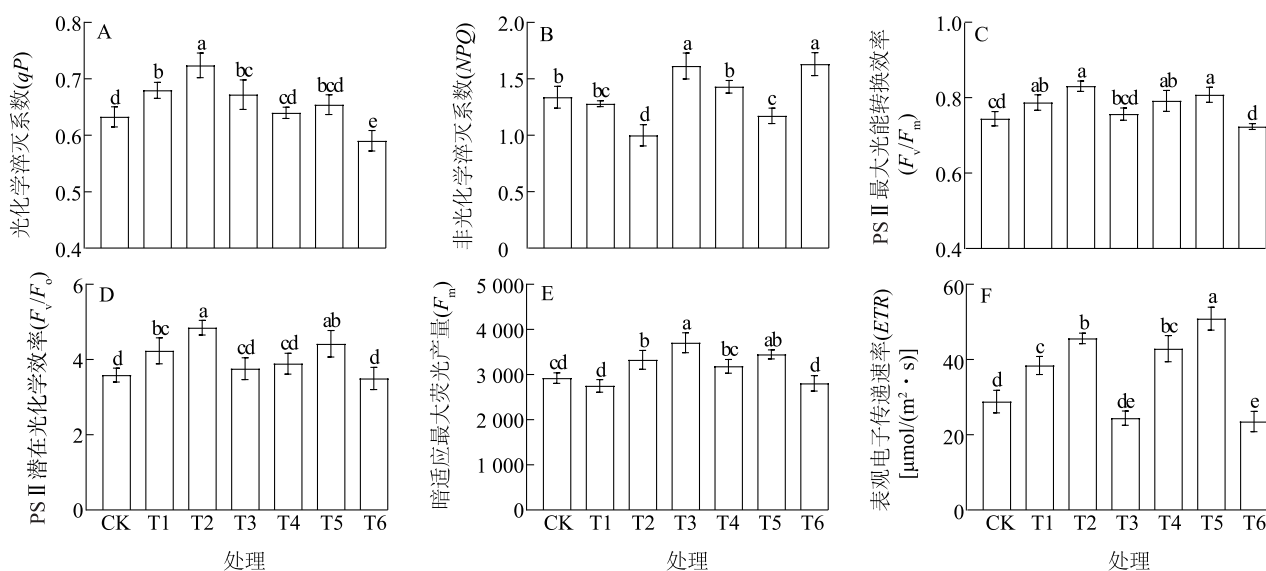
CK(对照):喷施蒸馏水;T1~T6 分别表示喷施 100 mg/L 6-BA、150 mg/L 6-BA、200 mg/L 6-BA、100 mg/L GA_3 、150 mg/L GA_3 、200 mg/L GA_3 。6-BA:6-苄氨基嘌呤; GA_3 :赤霉素。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。CAT:过氧化氢酶;POD:过氧化物酶。

图 4 不同含量的 6-BA、 GA_3 对蝴蝶兰幼苗 *CAT*、*POD* 活性的影响

Fig.4 Impacts of varying contents of 6-BA and GA_3 on the activities of *CAT* and *POD* in *Phalaenopsis* spp.

2.2.4 不同含量的 6-BA、 GA_3 对蝴蝶兰幼苗叶绿素荧光特性的影响 由图 5 可知,随着 6-BA 含量的增加,甜格格的 qP 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 ETR 参数均呈先升后降的趋势,T2 处理时最大,较 CK 依次升高了 14.38%、11.69%、35.42%、58.27%,T1 处理、T2 处理与 CK 间 qP 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 ETR 均达到显著差异 ($P < 0.05$)。NPQ 呈先降后升的趋势, F_m 呈上升趋势,T2 处理时 NPQ 达到最小值,且显著低于 CK ($P < 0.05$),较 CK 降低了 25.26%。T3 处理时 NPQ、 F_m 均达到最大值,显著高于 CK ($P < 0.05$),较 CK 分别升高了 20.67%、26.79%;随着 GA_3 含量的

增加, qP 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F_m 、 ETR 参数均表现为先升后降,T5 处理时达到最大值,T6 处理时达到最小值。T5 处理时较 CK 分别升高了 3.41%、8.51%、23.13%、18.03%、76.41%,T5 处理与 CK 间 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F_m 、 ETR 均达到显著差异 ($P < 0.05$),T6 处理与 CK 间 qP 、 ETR 均达到显著差异 ($P < 0.05$)。NPQ 表现为先降后升,T5 时最小,且与 CK 间达到显著差异 ($P < 0.05$),较 CK 降低了 12.34%。以上结果表明,100~150 mg/L 6-BA、 GA_3 均有利于增加 qP 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F_m 、 ETR ,降低 NPQ,且 6-BA 的促进效果优于 GA_3 。



CK(对照):喷施蒸馏水;T1~T6 分别表示喷施 100 mg/L 6-BA、150 mg/L 6-BA、200 mg/L 6-BA、100 mg/L GA₃、150 mg/L GA₃、200 mg/L GA₃。6-BA:6-苄氨基嘌呤;GA₃:赤霉素。不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

图5 不同含量的 6-BA、GA₃对蝴蝶兰幼苗叶绿素荧光参数的影响

Fig.5 Impacts of varying contents of 6-BA and GA₃ on parameters of chlorophyll fluorescence in *Phalaenopsis* spp. seedlings

2.2.5 不同含量的 6-BA、GA₃对蝴蝶兰幼苗光合特性的影响 由表 2 可知,随着 6-BA 含量升高,甜格格的 P_n、T_r 和 G_s 均呈先升后降的趋势,T2 处理时达到峰值,分别较 CK 显著升高了 42.19%、57.05% 和 27.59%。相反,C_i 于 T2 处理时达到最小值,较 CK 显著降低了 10.73%。T2 处理与 CK 间 P_n、T_r、G_s 及 C_i 均存在显著差异(P<0.05)。随着 GA₃ 含量的增

加,P_n、G_s 持续下降,T6 处理时达到最小值。而 T_r、C_i 呈先降后升的趋势,T6 处理时 C_i 达到最大值。CK 与 T6 处理间 G_s、C_i 均达到显著差异(P<0.05)。以上结果表明,150 mg/L 6-BA 能显著提高甜格格的 P_n、T_r 和 G_s,抑制 C_i。而 GA₃ 抑制 G_s,但 200 mg/L GA₃ 对 C_i 有显著的促进作用。

表 2 不同含量的 6-BA、GA₃对蝴蝶兰幼苗光合特性的影响

Table 2 Impacts of 6-BA and GA₃ applied at varying contents on photosynthetic properties of *Phalaenopsis* spp. seedlings

处理	净光合速率(P _n) [μmol/(m ² ·s)]	蒸腾速率(T _r) [mmol/(m ² ·s)]	气孔导度(G _s) [mol/(m ² ·s)]	胞间 CO ₂ 含量(C _i) (μmol/mol)
CK	1.280±0.550c	0.156±0.080bc	0.029±0.002b	347.48±13.80b
T1	1.680±0.360ab	0.227±0.580a	0.035±0.010a	334.20±48.20bc
T2	1.820±0.021a	0.245±0.280a	0.037±0.001a	310.20±35.27c
T3	1.550±0.011b	0.215±0.740b	0.034±0.004ab	325.82±17.20bc
T4	1.320±0.130b	0.139±0.050bc	0.028±0.005b	370.23±27.10a
T5	1.310±0.270bc	0.108±0.650c	0.025±0.002c	363.54±14.50ab
T6	1.280±0.045c	0.115±0.380c	0.025±0.006c	374.20±36.89a

CK(对照):喷施蒸馏水;T1~T6 分别表示喷施 100 mg/L 6-BA、150 mg/L 6-BA、200 mg/L 6-BA、100 mg/L GA₃、150 mg/L GA₃、200 mg/L GA₃。6-BA:6-苄氨基嘌呤;GA₃:赤霉素。不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

2.3 150 mg/L 6-BA 处理下蝴蝶兰花梗中内源激素含量的变化

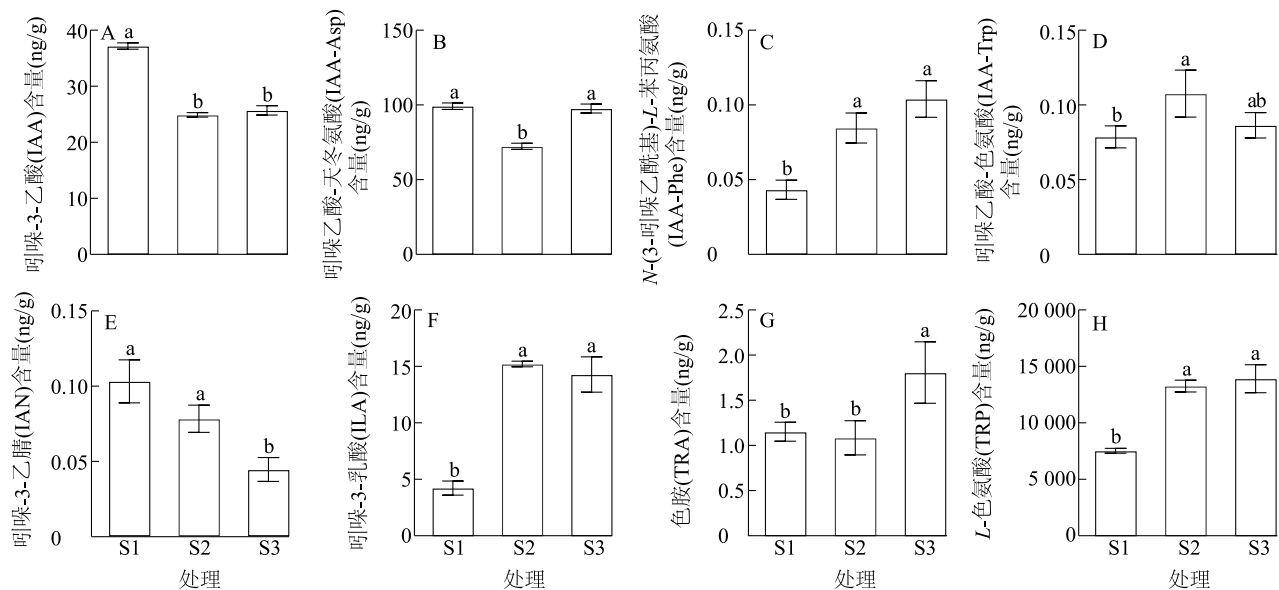
通过对比不同含量 6-BA、GA₃对甜格格生理特

性的影响,发现 6-BA 的整体处理效果优于 GA₃,且 150 mg/L 6-BA 处理效果最佳。

2.3.1 150 mg/L 6-BA 处理对蝴蝶兰花梗中生长素

类激素含量动态变化的影响 在 150 mg/L 6-BA 处理下,8 种生长素类激素的含量变化如图 6 所示,与 S1 时期相比,S3 时期生长素 (IAA)、吲哚-3-乙腈 (IAN) 含量分别显著降低了 30.92%、57.10%,S3 时期 *N*-(3-吲哚乙酰基)-*L*-苯丙氨酸 (IAA-Phe)、吲哚-3-乳酸 (ILA)、色胺 (TRA)、*L*-色氨酸 (TRP) 含量分

别为 S1 时期的 2.50 倍、3.38 倍、1.57 倍、1.85 倍,S3 时期吲哚乙酸-天冬氨酸 (IAA-Asp)、吲哚乙酸-色氨酸 (IAA-Trp) 激素含量无显著变化。这表明生长素类激素在蝴蝶兰成花过程中起决定性作用,是调控花芽分化的重要因素。



S1、S2、S3 分别表示在健康花梗的长度为 0.5 cm、1.0 cm、3.0 cm 时采集样品。6-BA:6-苄氨基嘌呤。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

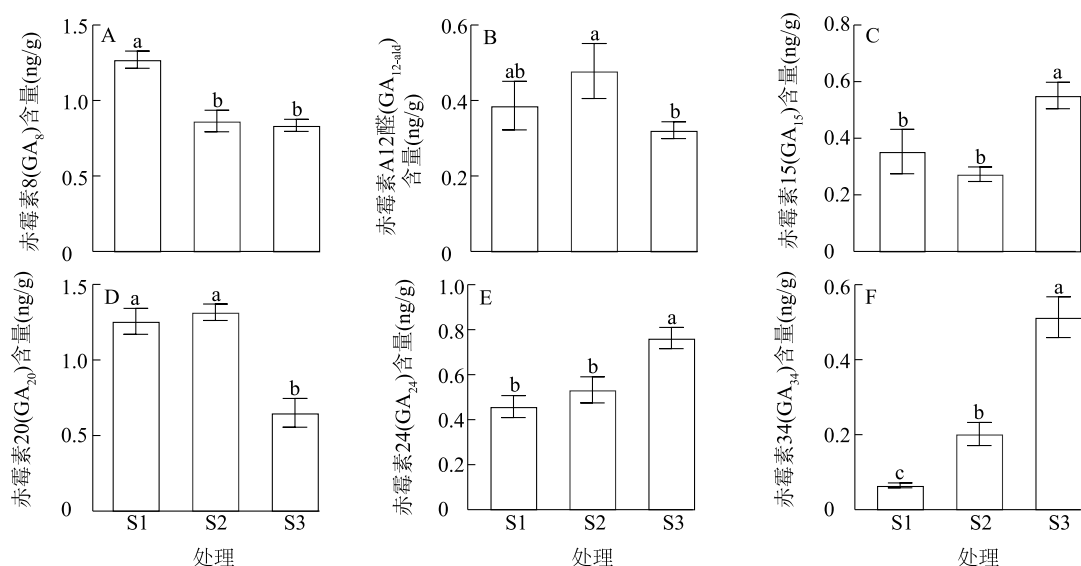
图 6 150 mg/L 6-BA 处理下蝴蝶兰花梗中生长素类激素的含量变化

Fig.6 Changes in endogenous auxin content in *Phalaenopsis* spp. pedicels under 150 mg/L 6-BA treatment

2.3.2 150 mg/L 6-BA 处理对蝴蝶兰花梗中赤霉素类激素含量动态变化的影响 在 150 mg/L 6-BA 处理下,共检测到了 GA_8 、 GA_{20} 、 GA_{15} 等 6 种赤霉素类激素,但未检测到 GA_3 。如图 7 所示,与 S1 时期相比,S3 时期 GA_8 、 GA_{20} 含量分别显著降低了 34.15%、48.15%,S2、S3 时期赤霉素 A12 醛 (GA_{12-ald}) 含量均无显著变化,S3 时期 GA_{15} 、 GA_{24} 、 GA_{34} 含量分别为 S1 时期的 1.57 倍、1.65 倍、7.29 倍。结果表明,在花梗发育早期,较高水平的赤霉素类激素有利于花梗快速伸长。

2.3.3 150 mg/L 6-BA 处理对蝴蝶兰花梗中细胞分裂素类激素含量动态变化的影响 在 150 mg/L 6-BA 处理下,8 种细胞分裂素类激素的含量变化如图 8 所示,2-甲硫基异戊烯基腺嘌呤核苷 (2MeSiPR)、顺式-玉米素-*D*-核糖苷 (cZR) 含量均呈

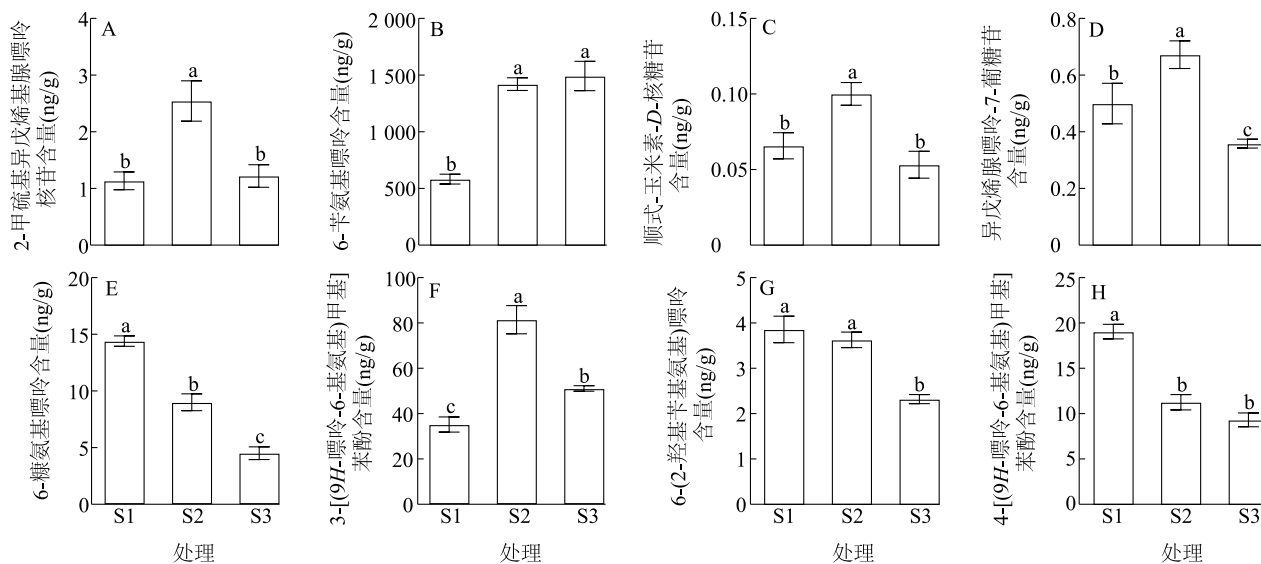
先升高后降低的趋势,与 S1 时期相比,S3 时期 2MeSiPR、cZR 含量均无显著变化,S3 时期 6-BA、3-[(9*H*-嘌呤-6-基氨基) 甲基] 苯酚 (mT) 含量分别为 S1 时期的 2.56 倍、1.46 倍,S3 时期异戊烯腺嘌呤-7-葡糖苷 (iP7G)、6-糠氨基嘌呤 (K)、6-(2-羟基苄基氨基) 嘌呤 (oT)、4-[(9*H*-嘌呤-6-基氨基) 甲基] 苯酚 (pT) 含量分别显著降低了 28.30%、68.87%、39.77%、51.08%。结果表明,在花梗发育的 3 个时期,细胞分裂素类激素含量均处于高水平。S1 时期细胞分裂素类激素主要促进花梗细胞的分裂和伸长,为花梗发育积累能量;S2 时期细胞分裂素类激素促进细胞分裂并开始调节花梗形态建成和组织分化;S3 时期细胞分裂素类激素促进花梗的最终发育和花芽的形成。因此,细胞分裂素类激素在蝴蝶兰花梗发育过程中起关键作用。



S1、S2、S3 分别表示在健康花梗的长度为 0.5 cm、1.0 cm、3.0 cm 时采集样品。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 7 150 mg/L 6-苄氨基嘌呤 (6-BA) 处理下蝴蝶兰花梗中赤霉素类激素的含量变化

Fig.7 Changes in endogenous gibberellin content in *Phalaenopsis* spp. pedicels under 150 mg/L 6-BA treatment



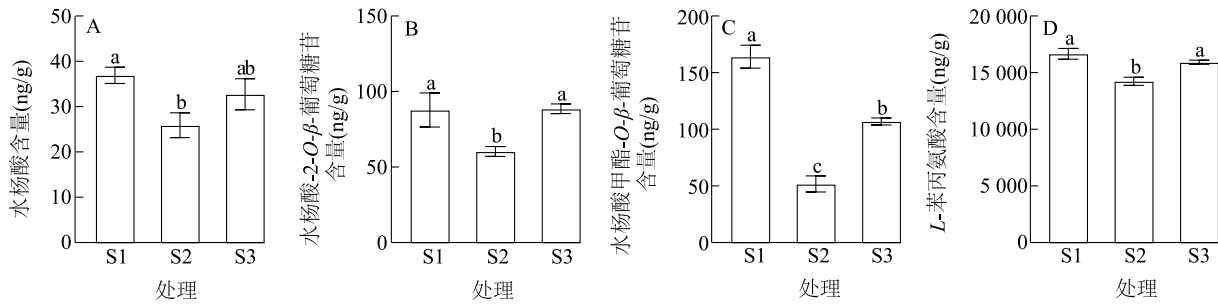
S1、S2、S3 分别表示在健康花梗的长度为 0.5 cm、1.0 cm、3.0 cm 时采集样品。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 8 150 mg/L 6-苄氨基嘌呤 (6-BA) 处理下蝴蝶兰花梗中细胞分裂素类激素的含量变化

Fig.8 Changes in endogenous cytokinin content in *Phalaenopsis* spp. pedicels under 150 mg/L 6-BA treatment

2.3.4 150 mg/L 6-BA 处理对蝴蝶兰花梗中水杨酸类激素含量动态变化的影响 在 150 mg/L 6-BA 处理下,甜格格花梗中检测到 4 种水杨酸类激素,含量变化均表现为先降后升(图 9)。与 S1 时期相比,S3 时期 SA、水杨酸-2-O-β-葡萄糖苷 (SAG)、L-苯丙氨酸 (Phe) 含量均无显著变化,以维持花梗的稳态。

水杨酸甲酯-O-β-葡萄糖苷 (MeSAG) 在 S1 时期的含量显著高于 S2、S3 时期 ($P < 0.05$),与 S1 时期相比,S2、S3 时期的 MeSAG 含量显著降低了 68.36%、34.78%,可能为花梗早期提供抗氧化和防御作用。因此,水杨酸类激素在蝴蝶兰花梗发育中起重要作用。



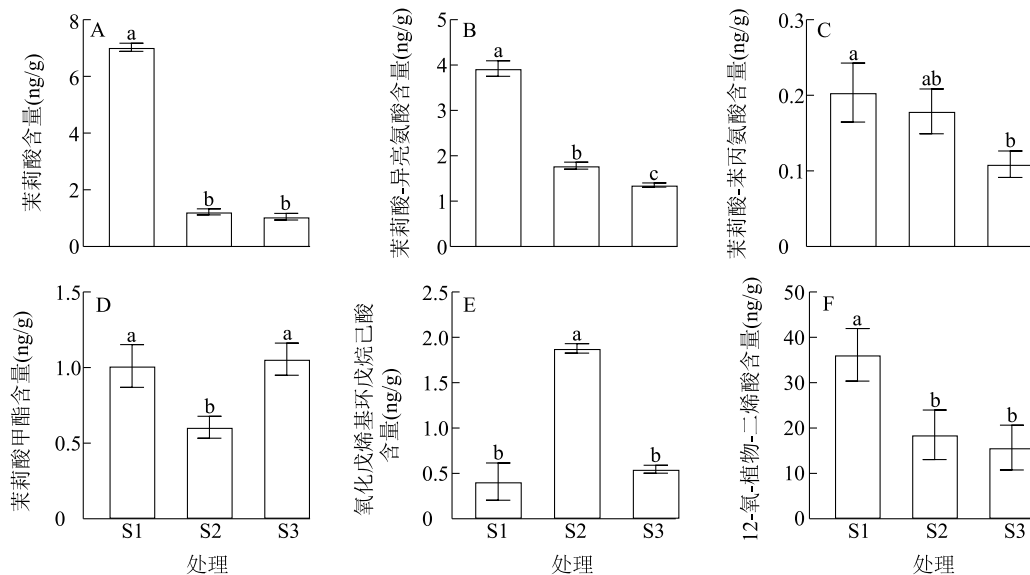
S1、S2、S3 分别表示在健康花梗的长度为 0.5 cm、1.0 cm、3.0 cm 时采集样品。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 9 150 mg/L 6-苄氨基嘌呤 (6-BA) 处理下蝴蝶兰花梗中水杨酸类激素的含量变化

Fig.9 Changes in endogenous salicylic acid content in *Phalaenopsis* spp. pedicels under 150 mg/L 6-BA treatment

2.3.5 150 mg/L 6-BA 处理对蝴蝶兰花梗中茉莉酸类激素含量动态变化的影响 本研究检测了 6 种茉莉酸类激素的含量变化,如图 10 所示,与 S1 时期相比,S3 时期茉莉酸 (JA)、茉莉酸-异亮氨酸 (JA-ILE)、茉莉酸-苯丙氨酸 (JA-Phe)、12-氧-植物-二烯酸 (OPDA) 分别显著降低了 85.04%、65.43%、46.51%、56.75%,表明这些激素在 S1 阶段具有较

高的活性,可能与花梗早期的防御机制有关,保护花梗不受非生物胁迫的影响;与 S1 时期相比,S3 时期茉莉酸甲酯 (MeJA)、氧化戊烯基环戊烷己酸 (OPC-6) 含量均无显著变化,但变化趋势不同,MeJA 含量呈先降后升的趋势而 OPC-6 含量呈先升后降的趋势,这些激素含量的变化可能与花梗发育后期的生理过程密切相关。



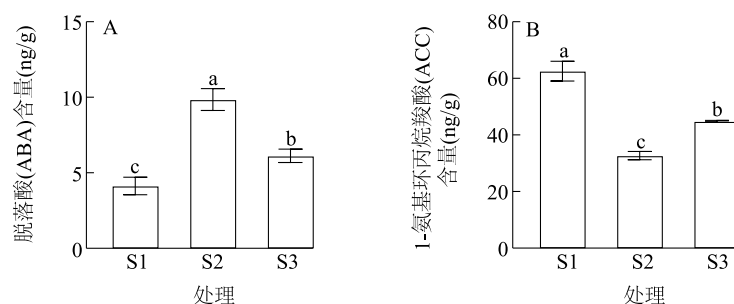
S1、S2、S3 分别表示在健康花梗的长度为 0.5 cm、1.0 cm、3.0 cm 时采集样品。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 10 150 mg/L 6-苄氨基嘌呤 (6-BA) 处理下蝴蝶兰花梗中茉莉酸类激素的含量变化

Fig.10 Changes in endogenous jasmonic acid content in *Phalaenopsis* spp. pedicels under 150 mg/L 6-BA treatment

2.3.6 150 mg/L 6-BA 处理对蝴蝶兰花梗中脱落酸和乙烯含量动态变化的影响 本研究检测了 ABA 和 ACC 的含量变化,如图 11 所示。ABA 在 S2、S3 时期的含量显著高于 S1 时期,分别为 S1 时期的 2.39 倍、1.48 倍。这表明在 S1 时期较低的 ABA 含

量有利于促进花梗发育,S2、S3 时期,ABA 含量升高有利于促进花梗成熟;ACC 在 S1 时期的含量显著高于 S2、S3 时期,S2、S3 时期 ACC 含量分别降低了 47.84%、28.38%。说明 ACC 含量随着花梗发育逐渐减弱,有助于延缓细胞衰老。



S1、S2、S3 分别表示在健康花梗的长度为 0.5 cm、1.0 cm、3.0 cm 时采集样品。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 11 150 mg/L 6-苄氨基嘌呤 (6-BA) 处理下蝴蝶兰花梗中脱落酸和乙烯的含量变化

Fig.11 Changes in endogenous abscisic acid and ethylene contents in *Phalaenopsis* spp. pedicels under 150 mg/L 6-BA treatment

3 讨论

3.1 不同含量的 6-BA、GA₃ 对蝴蝶兰幼苗生长指标的影响

外源激素 6-BA、GA₃ 等在调节植物生长发育的过程中起关键作用,主要通过改变内源激素的平衡,引起生长代谢活动产生变化^[17]。本研究发现,6-BA 能有效促进甜格格的生长,而 GA₃ 能显著增加甜格格茎高,降低叶宽和茎粗。表明 6-BA 能通过促进细胞分裂和分化,增加细胞数量,进而促进蝴蝶兰的整体生长。GA₃ 促进细胞纵向伸长,从而显著提高蝴蝶兰的茎高。这与前人的研究结果^[18-19] 基本一致。而 GA₃ 的抑制作用可能与激素间的拮抗作用有关。Lee 等^[20] 研究发现,单独施用 GA₃ 能显著降低蝴蝶兰的叶宽和茎粗,但同时施用 GA₃ 和 6-BA 时,抑制作用显著减弱。这表明 GA₃ 与 6-BA 的拮抗作用会抑制蝴蝶兰叶宽和茎粗的发育。GA₃ 可能通过抑制 6-BA 的活性,从而抑制蝴蝶兰细胞的横向增殖。

3.2 不同含量 6-BA、GA₃ 对蝴蝶兰幼苗生理指标的影响

叶片相对含水量是衡量植物组织水分保持状况的重要指标^[21]。叶绿素是光合作用的基础,其含量的高低可用于评估植物光合效率^[22]。本研究中,随着 6-BA 含量的增加,叶片相对含水量和叶绿素含量均表现为先升后降并于 150 mg/L 6-BA 处理时达到最大值。这表明 100~150 mg/L 6-BA 通过调节 ABA 信号路径抑制气孔关闭,并促进脯氨酸等渗透调节物质的积累,增强细胞保水能力,同时降低叶绿素分解酶活性,维持较高的叶绿素水平^[23]。6-BA

可能通过调节内源激素平衡和抗氧化酶活性,减少氧化损伤,提升光合色素稳定性。但 200 mg/L 6-BA 处理可能会导致活性氧积累,引发膜脂过氧化和叶绿素结构损伤,同时干扰渗透调节机制,抑制水分吸收并加速叶绿素降解^[24]。这种低含量促进、高含量抑制效应与植物对外源激素的敏感性及其含量阈值有关,适宜含量具有促进作用,但过量会引起代谢紊乱。GA₃ 处理会降低相对含水量,而对叶绿素含量无显著影响。Islam 等^[25] 研究发现,连续喷施 2 次 200 mg/L GA₃ 能显著提高绿豆的相对含水量。这与本研究结果不一致,出现此结果可能与 GA₃ 喷施的频率及所研究植物对 GA₃ 的敏感性有关。本研究中由于 GA₃ 通过促进细胞伸长和分裂提高代谢,导致水分亏缺;同时激活 CAT、POD 等抗氧化酶的活性诱导氧化胁迫,引起叶绿素降解,导致叶片黄化^[26]。

可溶性糖和可溶性蛋白质通过调节细胞渗透势,维持水分平衡及细胞生物膜透性^[27]。研究发现,6-BA 通过激活蔗糖合成酶和酸性转化酶,促进蔗糖、己糖的合成,从而提高可溶性糖含量^[28]。这与本研究结果基本一致:150 mg/L 6-BA 通过增强代谢酶活性、促进糖和蛋白质从叶片向生长点运输,有利于蝴蝶兰的生长。而高含量(200 mg/L) 6-BA 可能抑制了糖代谢关键酶的活性,且细胞过度分裂消耗能量,导致可溶性糖和可溶性蛋白质含量下降^[29]。本研究发现,GA₃ 处理能明显降低蝴蝶兰可溶性糖和可溶性蛋白质含量,但二者的抑制作用存在差异。可溶性糖含量随着 GA₃ 含量的升高而降低,可能是因为 GA₃ 促进蝴蝶兰花梗伸长,消耗大量光合产物,引起可溶性糖含量的减少。众多学者认为,150 mg/L GA₃ 为蝴蝶兰抽梗的最佳含量,但此时

对可溶性蛋白质含量的抑制作用最显著,可能与花梗发育时花序原基分化激增有关,蛋白酶活性升高、蛋白质水解加剧,导致可溶性蛋白质含量减少。

作为植物体内关键的抗氧化酶,*CAT*、*POD*通过清除细胞内的活性氧,维持胞内氧化还原稳态。Li等^[30]研究发现,在蝴蝶兰离体培养初期,低含量6-BA会降低类原球茎的*CAT*和*POD*活性;而高含量6-BA会显著增加蝴蝶兰类原球茎中的 H_2O_2 和丙二醛(MDA)含量,同时*POD*活性会补偿性增强^[31]。高晓芬等^[32]研究发现,用50 mg/L GA_3 处理不同的蝴蝶兰品种, GA_3 对蝴蝶兰*CAT*活性的调控存在品种特异性,这可能与其植株中的内源激素响应机制差异有关。

3.3 不同含量6-BA和 GA_3 对蝴蝶兰幼苗叶绿素荧光参数及光合作用的影响

叶绿素荧光参数能反映植物受胁迫时光合生理状况的损伤程度^[33]。本研究中,随着6-BA和 GA_3 含量的增加,蝴蝶兰叶片中 qP 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、*ETR*均呈先升后降的趋势,并以150 mg/L处理为最佳。除*ETR*外, qP 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 均表现为6-BA处理优于 GA_3 。说明施加适量外源6-BA、 GA_3 能有效增加蝴蝶兰的电子传递速率、光能转化效率和PS II光化学效率。然而,超过最适含量后,6-BA、 GA_3 会抑制蝴蝶兰的光合能力,导致光能转换受阻,影响植株正常生长发育。

光合参数能反映光合作用的强弱。本研究发现,随着6-BA含量的增加, P_n 、 G_s 、 T_r 均呈倒“V”形趋势,而 C_i 与之相反。150 mg/L 6-BA时蝴蝶兰的光合效率提高, G_s 和 T_r 增加,有利于 CO_2 的进入和光合作用的进行。然而,当激素含量超过一定范围时, G_s 下降且 C_i 上升,这表明在6-BA处理下,蝴蝶兰 P_n 下降主要是由非气孔限制引起的。

3.4 150 mg/L 6-BA处理对蝴蝶兰内源激素含量的影响

外源激素对植物生长发育的调控,通常是多种激素综合作用的结果^[34]。研究结果表明,内源激素在蝴蝶兰花梗发育的不同阶段呈动态变化,ABA含量下降和GA含量上升有利于打破花梗芽休眠,其中由 GA_{20} 氧化酶和ABA 8'-羟化酶这2个关键酶通过改变内源激素代谢打破侧芽休眠从而驱动花序伸长^[35]。本研究发现,S1时期,生长素类激素IAA含量、IAN含量与茉莉酸类激素JA、JA-ILE等含量同

时升高,这表明二者协同促进细胞伸长和花序原基分化^[36];含量较高的赤霉素类激素 GA_8 、 GA_{20} 与含量较低的ABA形成拮抗作用,GA打破休眠并促进细胞伸长而ABA则诱导休眠并抑制生长,二者的动态平衡决定了花梗的初始生长速率,这与Shu等^[37]的研究结果一致;ACC含量较高有助于解除顶端优势,优先促进花梗发育和早期形态建成。S3时期,IAA-Phe、ILA等生长素类激素积累,有利于维持顶端优势。 GA_{24} 、 GA_{34} 等赤霉素类激素含量上升,促进蝴蝶兰花梗的伸长与成熟^[38]。SA等水杨酸类激素在S3时期仍保持高水平,有助于增强抗逆性和生理稳定性。

4 结论

100~150 mg/L 6-BA、 GA_3 能促进甜格格的叶长、茎高的增加(除100 mg/L GA_3 对茎高的影响),增加 qP 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F_m (除100 mg/L 6-BA)、*ETR*,提高 P_n ,抑制*NPQ*,表明适宜含量的6-BA、 GA_3 能促进蝴蝶兰生长并提高光合效率,提高其对光能的捕获和利用率,从而提高生长速率。2种外源激素中,6-BA的促进效果更好,其中150 mg/L 6-BA处理效果最佳。在150 mg/L 6-BA处理下,蝴蝶兰花梗中内源激素含量随花梗发育呈动态变化。IAA、JA、ACC主要作用于S1时期,6-BA、ABA主要作用于S2~S3时期,且内源激素的含量变化在不同时期差异较大,表明其在花梗发育过程中是协同作用的。

参考文献:

- [1] 贺雅萍,肖文芳,陈和明,等. 蝴蝶兰抽梗影响因素及调控方法研究进展[J]. 热带作物学报,2023,44(11):2149-2156.
- [2] CHEN C. Evaluation of the effect of temperature on a stem elongation model of *Phalaenopsis*[J]. Horticulturae,2019,5(4):76-88.
- [3] WANG F L, HU Z R, LUO H H, et al. The functional verification of CmSMXL6 from *Chrysanthemum* in the regulation of branching in *Arabidopsis thaliana*[J]. Horticulturae,2024,10(7):718-731.
- [4] YU S, GALVÃO V C, ZHANG Y C, et al. Gibberellin regulates the *Arabidopsis* floral transition through miR156-targeted *SQUAMOSA* Promoter binding-like transcription factors[J]. The Plant Cell,2012,24(8):3320-3332.
- [5] LI Y T, HAN X, REN H, et al. Exogenous SA or 6-BA maintains photosynthetic activity in maize leaves under high temperature stress[J]. The Crop Journal,2023,11(2):605-617.
- [6] WANG C, ZHANG J, LI J, et al. Exogenous methyl jasmonate

- regulates endogenous hormone synthesis of soilless cultivated Chinese chive to promote growth physiology and photosynthesis [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 327: 112861.
- [7] GUAN Y R, XUE J Q, XUE Y Q, et al. Effect of exogenous GA₃ on flowering quality, endogenous hormones, and hormone-and flowering-associated gene expression in forcing-cultured tree peony (*Paeonia suffruticosa*) [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(6): 1295-1311.
- [8] ZHANG S W, ZHANG D, FAN S, et al. Effect of exogenous GA₃ and its inhibitor paclobutrazol on floral formation, endogenous hormones, and flowering-associated genes in 'Fuji' apple (*Malus domestica* Borkh.) [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 107: 178-186.
- [9] ZHANG J Q, ZHENG D F, FENG N J, et al. Regulation of exogenous strigolactone on storage substance metabolism and endogenous hormone levels in the early germination stage of rice seeds under salt stress [J]. *Antioxidants*, 2024, 14(1): 22-40.
- [10] 许申平, 袁秀云, 张燕, 等. 温度与光照强度对蝴蝶兰光合生理与花序发育的影响 [J]. *浙江农业学报*, 2023, 35(10): 2389-2397.
- [11] 陈丹, 王丹, 孙丽, 等. 外源水杨酸对低温胁迫下蝴蝶兰的缓解效应及其抗氧化生理特征变化 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2014, 40(3): 266-274.
- [12] 张志良, 瞿伟菁. *植物生理学实验指导* [M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [13] 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.
- [14] 位杰, 吴翠云, 蒋媛, 等. 萘酚法测定红枣可溶性糖含量条件的优化 [J]. *食品科学*, 2014, 35(24): 136-140.
- [15] 王桂兰, 乔永旭, 陈超, 等. 蝴蝶兰催花及开花过程中可溶性蛋白含量变化的研究 [J]. *北方园艺*, 2007(4): 121-124.
- [16] 刘万鹏, 郭茂伟, 朱琳, 等. 内源激素对扁蓿豆荚果开裂影响的研究 [J]. *中国草地学报*, 2024, 46(7): 27-34.
- [17] 贾燕伟, 祁娟, 赛宁刚, 等. 外源赤霉素和吲哚乙酸对老芒麦生长、生理特性及染色体端粒的调控 [J]. *草地学报*, 2023, 31(2): 456-463.
- [18] LEE Z H, HIRAKAWA T, YAMAGUCHI N, et al. The roles of plant hormones and their interactions with regulatory genes in determining meristem activity [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(16): 4065.
- [19] GAO X F, HAO Y, YANG X Y, et al. Transcriptomics and metabolomics analysis reveal the mechanism of hormones regulation of the flower bud formation and development in *Phalaenopsis* Orchid [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2025, 44(7): 4073-4089.
- [20] LEE H B, IM N H, AN S K, et al. Changes of growth and inflorescence initiation by exogenous gibberellic acid 3 and 6-benzylaminopurine application in *Phalaenopsis* orchids [J]. *Agronomy*, 2021, 11(2): 196-205.
- [21] 苏立娜, 麻冬梅, 李嘉文, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下两种紫花苜蓿生理及光合特性的影响 [J]. *草地学报*, 2023, 31(3): 726-732.
- [22] 郑豪亮, 张晨晨, 张博勇, 等. 外源激动素与 2,4-表油菜素内酯对元宝枫叶片和翅果碳水化合物代谢的影响 [J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(3): 100-105.
- [23] ZHANG L, SHI X L, HOU H X, et al. 6-benzyladenine treatment maintains storage quality of Chinese flowering cabbage by inhibiting chlorophyll degradation and enhancing antioxidant capacity [J]. *Plants*, 2023, 12(2): 334-346.
- [24] LEI W, LI Y, YAO X H, et al. NAP is involved in GA-mediated chlorophyll degradation and leaf senescence by interacting with DELLAs in *Arabidopsis* [J]. *Plant Cell Reports*, 2020, 39(1): 75-87.
- [25] ISLAM M S, HASAN M K, ISLAM M R, et al. Water relations and yield characteristics of mungbean as influenced by foliar application of gibberellic acid (GA₃) [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11: 1048768.
- [26] LI J, WEN J Q, WU K L, et al. Integrating physiology, cytology, and transcriptome to reveal the leaf variegation mechanism in *Phalaenopsis chia* E yenlin variegata leaves [J]. *Biomolecules*, 2024, 14(8): 963.
- [27] 孙媛媛, 谢欢, 艾星梅, 等. 外源生长素调控睡莲叶片生长和延缓衰老的生理效应 [J]. *西南林业大学学报*, 2025, 45(5): 56-64.
- [28] FANG S, HU W, WANG S S, et al. Exogenous application of 6-BA and GA₃ collaboratively improves cottonseed yield and seed quality via altering production of carbohydrates in the embryo [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(3): 329-341.
- [29] TEJEDA-SARTORIUS O, SOTO-HERNÁNDEZ R M, MIGUEL-CHÁVEZ R S, et al. Endogenous hormone profile and sugars display differential distribution in leaves and pseudobulbs of *Laelia anceps* plants induced and non-induced to flowering by exogenous gibberellic acid [J]. *Plants*, 2022, 11(7): 845-861.
- [30] LI Y Y, HAO Z G, MIAO S, et al. Profiles of cytokinins metabolic genes and endogenous cytokinins dynamics during shoot multiplication *in vitro* of *Phalaenopsis* [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(7): 3755.
- [31] 刘福平, 陈淳, 程小兵, 等. 培养基中附加 6-BA 长期继代培养对蝴蝶兰类原球茎活力及生理生化指标的影响 [J]. *热带作物学报*, 2021, 42(2): 428-435.
- [32] 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.
- [33] 周英, 谢科, 蔡汉, 等. 盐胁迫下外源褪黑素和丛枝菌根真菌对月季幼苗生长生理特性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2024, 44(3): 370-380.
- [34] 李斗, 王宇航, 杨江山, 等. 外源亚精胺对酿酒葡萄叶片氮代谢、内源激素动态变化及果实品质的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(8): 1533-1541.
- [35] LI Z, XIAO W F, CHEN H M, et al. Transcriptome analysis reveals endogenous hormone changes during spike development in *Phalaenopsis* [J]. *International Journal of Molecular Sciences*,

- 2022,23(18):10461.
- [36] 彭怡琳,刘敏,蒋芳玲,等.大蒜气三鳞茎形态发生及其碳水化合物和内源激素含量以及相关基因表达的变化特征[J].西北植物学报,2021,41(6):984-994.
- [37] SHU K, ZHANG H W, WANG S F, et al. ABI4 regulates primary seed dormancy by regulating the biogenesis of abscisic acid and gibberellins in *Arabidopsis* [J]. PLoS Genetics, 2013, 9(6): e1003577.
- [38] ZHANG Y J, LI A, LIU X Q, et al. Changes in the morphology of the bud meristem and the levels of endogenous hormones after low temperature treatment of different *Phalaenopsis* cultivars[J]. South African Journal of Botany, 2019, 125:499-504.

(责任编辑:陈海霞)