

刘红, 魏晓羽, 马辉, 等. 春化对春兰开花性状和生理生化特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(7): 1289-1301.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.07.005

春化对春兰开花性状和生理生化特性的影响

刘红, 魏晓羽, 马辉, 王悠, 孙叶
(江苏里下河地区农业科学研究所, 江苏扬州 225007)

摘要: 本研究以春兰宋梅为试验材料, 系统探究不同春化温度和春化时间对其开花性状和生理生化指标的影响。结果表明, 与室温春化处理相比, 4℃低温春化可显著提高春兰的开花率, 4℃低温春化处理 60 d 即可使春兰开花率超过 90%, 且不影响其开花品质。在渗透调节系统方面, 4℃低温春化处理 90 d 的春兰植株可溶性糖含量显著低于室温春化的春兰植株 ($P < 0.05$), 4℃低温春化处理 90 d 的春兰植株可溶性蛋白质含量显著高于室温春化的春兰植株 ($P < 0.05$), 表明 4℃低温春化能够促进春兰植株中可溶性糖向可溶性蛋白质的转化。同时 4℃低温春化能够促进春兰植株快速合成脯氨酸, 保护细胞膜结构。在抗氧化系统方面, 随着春化处理时间的延长, 4℃低温春化处理的春兰植株丙二醛 (MDA) 含量整体上持续下降, 而室温春化处理的春兰丙二醛 (MDA) 含量呈波动变化, 表明 4℃低温更有利于维持细胞膜完整性。4℃低温春化处理 30 d 的春兰叶片超氧化物歧化酶活性达到最大值, 4℃低温春化处理 60 d 的春兰叶片过氧化氢酶活性达到最大值。在长期低温胁迫下, 春兰植株的抗氧化酶活性与丙二醛含量保持动态平衡, 使其维持细胞膜结构的完整性和细胞的稳态。在光合系统方面, 随着春化处理时间的延长, 4℃低温春化处理的春兰叶片叶绿素含量波动但总体保持稳定, 表明 4℃低温未对春兰光合能力造成不可逆损伤, 春兰能够通过自身调节机制维持光合器官的结构与功能完整性。本研究结果为春兰规模化花期调控提供了理论依据。

关键词: 春兰; 春化; 开花形状; 生理生化指标

中图分类号: S353+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)07-1289-13

Effects of vernalization on flowering traits and physiological and biochemical characteristics of *Cymbidium goeringii*

LIU Hong, WEI Xiaoyu, MA Hui, WANG You, SUN Ye
(Institute of Agricultural Sciences of Lixiahe Districts, Yangzhou 225007, China)

Abstract: The study used the *Cymbidium goeringii* Songmei as the experimental material to systematically investigate the effects of different vernalization temperatures and durations on flowering traits and physiological and biochemical indicators. The results showed that compared with room temperature vernalization, vernalization at 4℃ significantly increased the flowering rate of *Cymbidium goeringii*. A 60-day vernalization treatment at 4℃ could increase the flowering rate to over 90%, without affecting the flowering quality. In terms of osmotic regulation, the content of soluble sugar in *Cymbidium goeringii*

收稿日期: 2024-11-29

基金项目: 2024 年省级农业科技创新与推广补助专项 [扬农办 (2024) 101 号]; 江苏省农业种质资源保护与利用平台项目 (JSGB2018-1); 江苏里下河地区农科所科研发展专项基金项目 [SJ(22)105]

作者简介: 刘红 (1986-), 女, 黑龙江伊春人, 硕士, 助理研究员, 主要从事花卉遗传育种与产业化关键技术研究。(E-mail) liuhong_ivy@126.com

通讯作者: 孙叶, (E-mail) sunye9999@126.com

plants treated with 4℃ vernalization for 90 days was significantly lower than that in plants treated with room temperature vernalization ($P < 0.05$), while the content of soluble protein was significantly higher ($P < 0.05$). This indicated that 4℃ vernalization promoted the conversion of soluble sugar to soluble protein in *Cymbidium goeringii*. At the same time, 4℃ vernalization also promoted the rapid synthesis of proline in *Cymbidium goeringii*, and protected the cell membrane structure. Regarding the antioxidant sys-

tem, as the duration of vernalization treatment increased, the content of malondialdehyde (MDA) in *Cymbidium goeringii* plants treated with 4 °C vernalization continued to decline on the whole, while the MDA content in plants treated with room temperature vernalization showed fluctuating changes. This suggested that 4 °C vernalization was more conducive to maintaining cell membrane integrity. The activity of superoxide dismutase in the leaves of *Cymbidium goeringii* treated with 4 °C vernalization for 30 days reached its maximum value, and the activity of catalase in the leaves of plants treated for 60 days reached its maximum value. Under long-term low-temperature stress, the activities of antioxidant enzymes and MDA content in *Cymbidium goeringii* maintained a dynamic balance, which helped to maintain the integrity of cell membrane structure and cellular homeostasis. In terms of the photosynthetic system, as the duration of vernalization treatment increased, the chlorophyll content in the leaves of *Cymbidium goeringii* treated with 4 °C vernalization fluctuated but remained stable overall. This indicated that 4 °C vernalization did not cause irreversible damage to the photosynthetic capacity of *Cymbidium goeringii*. *Cymbidium goeringii* could maintain the integrity of structure and function of its photosynthetic organs through its own regulatory mechanisms. This study provides a theoretical basis for the large-scale flowering regulation of *Cymbidium goeringii*.

Key words: *Cymbidium goeringii*; vernalization; flowering traits; physiological and biochemical indicators

春兰是兰科兰属多年生草本植物,在中国已有数千年的栽培历史。其株型典雅、瓣型丰富、花香清幽,兼具观赏价值、经济价值和文化价值^[1]。春兰的花芽分化于 8 月完成,随后进入生长缓慢的半休眠状态,自然花期集中在 2~3 月。然而,这种花期与春节花卉销售旺季存在时间错位,导致其市场竞争力受限,直接影响经济效益和产业发展。因此,调控春兰花期提前至春节前,对提升其经济价值具有重要意义。

温度是调控植物成花的关键环境因子^[2]。冬性植物需通过低温春化完成生殖生长,该过程依赖于冷刺激的定量积累^[3-4],春兰是典型的低温诱导开花植物^[5-7]。研究表明,经历短时低温或未经历春化处理的春兰不能正常开花;而昼温/夜温 25 °C/10 °C 处理 40 d 以上,或 3~6 °C 持续处理 40 d 均可使春兰花期提前^[8-9]。5 °C 以下低温累积 105~350 h 可有效诱导春兰花芽分化,使盛花期提前至春节前 15 d 左右^[10]。从生理机制来看,春化能够重构渗透调节物质动态平衡、激活抗氧化酶系统和调控内源激素网络^[11-13]。不同物种和不同组织对春化的响应存在显著差异^[14-16]。

本研究以春兰品种宋梅为试验材料,探究春化温度与持续时间对春兰生理生化指标和开花性状的影响,以期阐明春兰春化调控机制,为春兰花期精准调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为春兰宋梅(*Cymbidium goeringii* Song Mei),来自江苏里下河地区农业科学研究所中国兰种质资源圃。栽培基质按树皮:草炭:植金石:草

炭=4:1:1:1(体积比)配制。

1.2 试验方法

1.2.1 春化处理 试验于 2023 年 10 月下旬在江苏里下河地区农业科学研究所中国兰种质资源圃进行。选取长势良好、根系完整、假鳞茎粗壮、无病虫害且花芽出土 3~4 cm 的春兰植株,每盆 3~6 株苗,每株苗 1~3 个花芽。试验前对植株适当控水,叶面喷施 1 g/L 磷酸二氢钾溶液。将植株随机分为 2 组,第 1 组春兰在无加温玻璃温室中培养,依靠自然光照和通风,试验期间温室内环境温度变化如图 1 所示;第 2 组春兰脱盆后洗净根系,晾干表面水分,置于泡沫箱中转入 4 °C 冷库进行低温春化处理。试验周期 90 d,每处理设 3 次重复。分别于处理当天与处理 15 d、30 d、60 d 和 90 d 取春兰叶片、花苞、假鳞茎及根部组织,分为 2 份,一份用于水分含量测定,另一份用于生理生化指标测定。

1.2.2 催花处理 室温春化的春兰分别于 45 d(有效低温时数 93 h)、60 d(有效低温时数 269 h)、67 d(有效低温时数 291 h)、74 d(有效低温时数 316 h)转入催花温室(昼/夜 25~26 °C/15~16 °C);4 °C 低温春化的春兰分别于 45 d、60 d、67 d、74 d 取出,在 15 °C 条件下适应 1 d 转入催花温室(昼温/夜温 25~26 °C/15~16 °C)。催花期间每 15 d 叶面喷施 1 次 0.5 mg/L 磷酸二氢钾溶液。每处理设 3 次重复,每重复 10 盆春兰。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 开花相关指标测定 分别记录春兰始花期、末花期,统计开花所需时间、花期、开花率,并测定始花时和开花 7 d 时的花葶高。开花率=(开花的花

朵数/花芽总数) $\times 100\%$;开花所需天数(d):从转入催花温室至开花所需天数;开花持续时间(d):从始

花期至末花期持续天数;花葶高(cm):从假鳞茎顶部到花朵基部的距离。

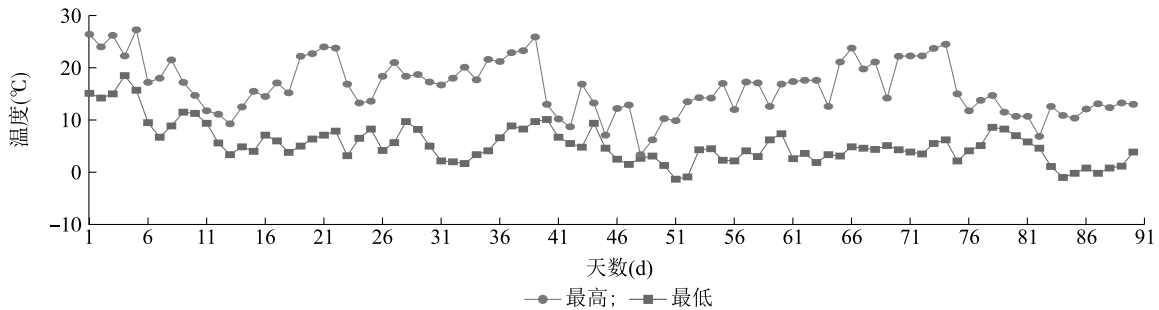


图1 室温变化

Fig.1 Room temperature variation

1.3.2 生理生化指标测定 采用蒽酮比色法测定植物可溶性糖(SS)含量,采用考马斯亮蓝 G-250 比色法测定可溶性蛋白质(SP)含量,采用分光光度法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性以及丙二醛(MDA)含量、游离脯氨酸(Pro)含量,采用乙醇法测定总叶绿素含量^[17]。

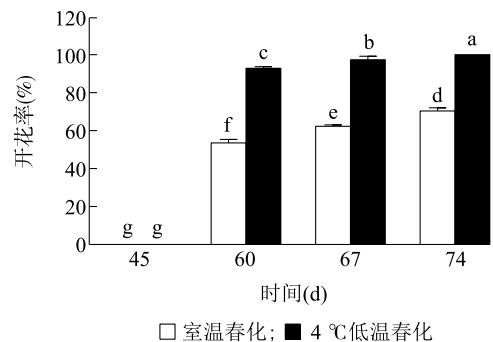
1.3.3 数据处理 各指标均进行3次重复测定,数据以平均值 \pm 标准误差表示。使用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理与初步分析;使用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析;使用 Duncan's 法多重比较检验组间差异的显著性;使用 Origin 2021 软件进行相关性分析;使用 GraphPad Prism 6 绘制图片。

2 结果与分析

2.1 不同春化温度和春化时间对春兰开花率的影响

春兰植株分别在室温和 4℃低温下春化处理 45 d、60 d、67 d 和 74 d,转移至温室进行催花并统计开花率。如图 2 所示,室温春化处理和 4℃低温春化处理 45 d 的春兰开花率均为 0。随春化处理时间的延长,春兰开花率呈上升趋势。4℃春化处理 60 d、67 d、74 d 的春兰开花率显著高于室温春化处理 60 d、67 d、74 d 的春兰开花率($P < 0.05$)。综上,春兰开花需要一定时间的春化处理,与室温春化处理相比,4℃低温春化处理能使春兰使开花率显著上升。

如图 3 所示,随 4℃低温春化时间的延长,春兰达到最大开花率所需催花时间越短。4℃低温春化处理 60 d、67 d、74 d 的春兰达到最大开花率所需催花时间分别为 24 d、22 d 和 16 d。4℃低温春化处理 67 d 的春兰开花最早,于催花后第 6 d 后开花,比 4



图柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图2 不同春化温度和春化时间下春兰的开花率

Fig.2 The flowering rate of *Cymbidium goeringii* under different vernalization temperatures and durations

℃低温春化处理 60 d、74 d 的春兰提前 2 d 开花。4℃低温春化处理 60 d、67 d、74 d 的春兰在催花后第 24 d、22 d 和 16 d 开花率分别达到 92.86%、92.11%、100.00%。表明随着 4℃低温春化时间的延长,春兰开花率超过 90.00% 所需的催花时间越短。

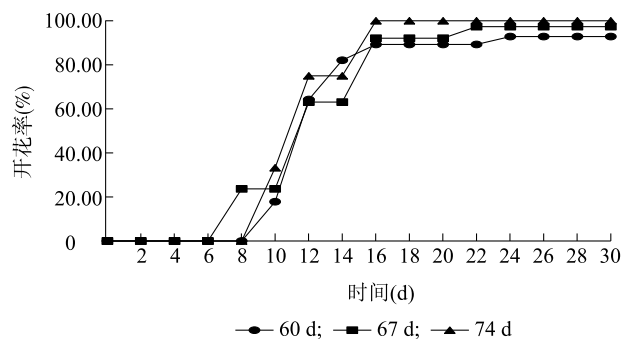


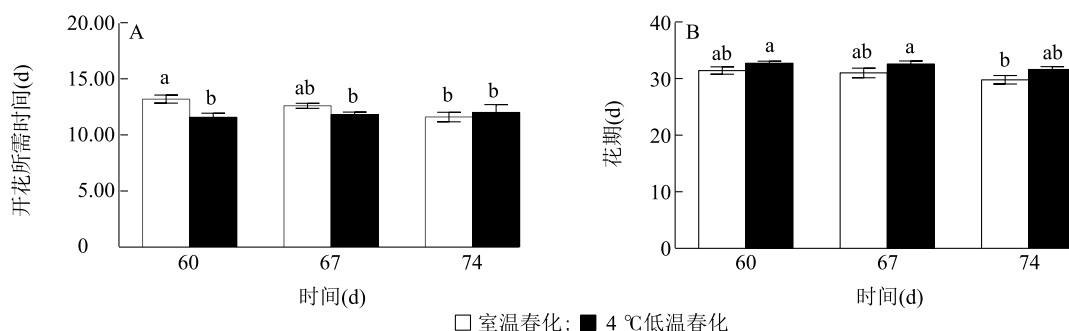
图3 4℃低温春化时间对春兰开花率的影响

Fig.3 The effect of 4℃ low-temperature vernalization duration on the flowering rate of *Cymbidium goeringii*

2.2 春化时间对春兰开花所需时间和花期的影响

如图 4 所示,随着春化时间的延长,春兰开花所需催花时间缩短。室温春化处理 60 d 的春兰开花所需催花时间为 13.20 d,显著高于 4 °C 低温春化处

理 60 d 的春兰 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 60 d、67 d、74 d 的春兰花期和室温春化处理 60 d、67 d、74 d 的春兰均无显著差异 ($P > 0.05$)。



图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

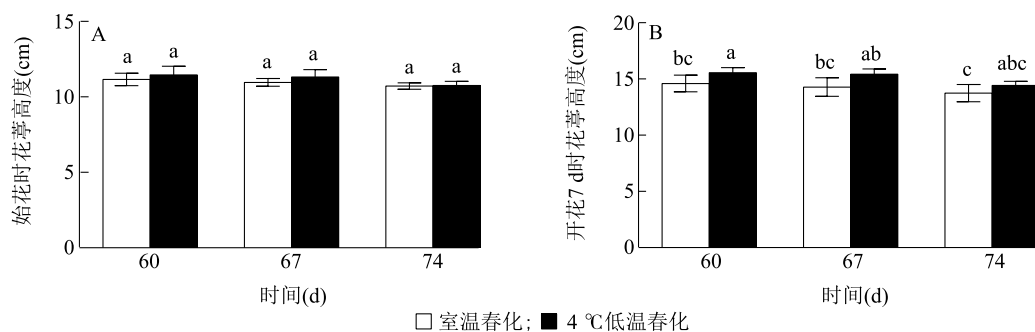
图 4 不同春化温度和春化时间对春兰开花所需时间和花期的影响

Fig.4 The effects of different vernalization temperatures and durations on the time required for flowering and flowering period of *Cymbidium goeringii*

2.3 不同春化温度和春化时间对春兰花葶高度的影响

如图 5 所示,4 °C 低温春化处理 60 d、67 d、74 d 的春兰始花时花葶高度和室温春化处理 60 d、67 d、

74 d 的春兰均无显著差异 ($P > 0.05$)。4 °C 低温春化处理 60 d 的春兰开花 7 d 时花葶高度显著高于室温春化处理 60 d 的春兰 ($P < 0.05$)。



图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同春化温度和春化时间对春兰花葶高度的影响

Fig.5 The effects of different vernalization temperatures and durations on the flowering stem height of *Cymbidium goeringii*

2.4 春化时间与春兰开花率、开花时间、开花品质的相关性分析

2.4.1 室温春化时间与春兰开花性状的相关性分析 如表 1 所示,室温春化条件下,春兰春化时间与开花率呈极显著正相关 ($P < 0.01$);春兰春化时间与开花所需时间呈极显著负相关 ($P < 0.01$);春兰开花率与开花所需时间呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

2.4.2 4 °C 低温春化时间与春兰开花性状的相关性分析 如表 2 所示,4 °C 低温春化条件下,春兰春化时间与开花率呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

2.5 不同春化温度和春化时间对春兰渗透调节物质含量的影响

如图 6 所示,室温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰叶片可溶性糖含量均显著高于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、60 d 的春兰叶片可溶性糖含量均显著高于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。室温春化处理 30 d 的春兰花苞可溶性糖含量显著低于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、60 d 的春兰花苞可溶性糖含量均显著低于未春化的春兰花苞

表 1 室温春化时间与春兰开花性状的相关性分析

Table 1 Analysis of the correlation between room temperature vernalization duration and flowering traits of *Cymbidium goeringii*

性状	相关系数					
	春化时间	开花率	开花所需时间	花期	始花时花葶高度	开花 7 d 时花葶高度
春化时间	1.000					
开花率	1.000**	1.000				
开花所需时间	-0.584**	-0.583**	1.000			
花期	-0.384	-0.381	0.018	1.000		
始花时花葶高度	-0.236	-0.236	0.124	0.152	1.000	
开花 7 d 时花葶高度	-0.448	-0.447	-0.142	0.276	0.228	1.000

* 表示在 0.05 水平显著相关, ** 表示在 0.01 水平极显著相关。

表 2 4 ℃低温春化时间与春兰开花性状的相关性分析

Table 2 Analysis of the correlation between 4 ℃ low-temperature vernalization duration and flowering traits of *Cymbidium goeringii*

性状	相关系数					
	春化时间	开花率	开花所需时间	花期	始花时花葶高度	开花 7 d 时花葶高度
春化时间	1.000					
开花率	0.988**	1.000				
开花所需时间	0.065	0.070	1.000			
花期	-0.412	-0.381	-0.080	1.000		
始花时花葶高度	-0.250	-0.235	-0.043	0.146	1.000	
开花 7 d 时花葶高度	-0.417	-0.388	-0.106	0.065	0.478	1.000

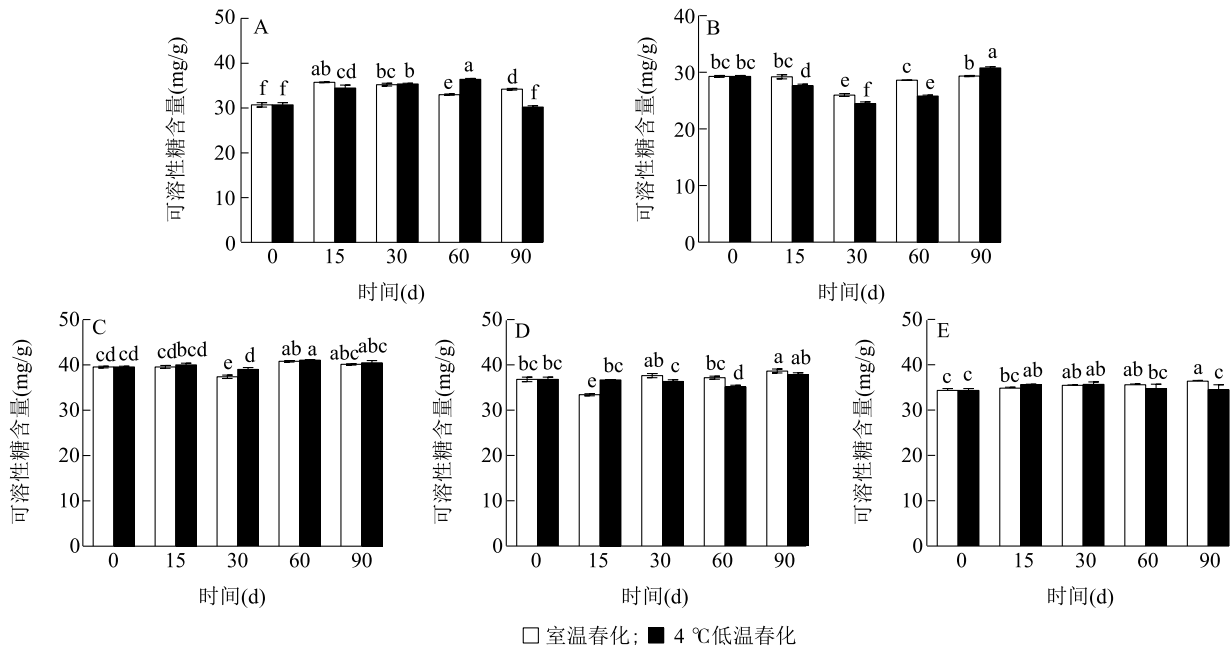
* 表示在 0.05 水平显著相关, ** 表示在 0.01 水平极显著相关。

($P < 0.05$), 而处理 90 d 后的春兰花苞可溶性糖含量显著高于未春化春兰花苞 ($P < 0.05$)。室温春化处理 30 d 的春兰假鳞茎可溶性糖含量显著低于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$), 而处理 60 d 的春兰假鳞茎可溶性糖含量显著高于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。4 ℃低温春化处理 60 d 的春兰假鳞茎可溶性糖含量显著高于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d 的春兰根可溶性糖含量显著低于未春化的春兰根 ($P < 0.05$), 而室温春化处理 90 d 的春兰根可溶性糖含量显著高于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。4 ℃低温春化处理 60 d 的春兰根可溶性糖含量显著低于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。4 ℃低温春化处理 90 d 的春兰植株可溶性糖含量显著低于室温春化处理 90 d 的春兰植株 ($P < 0.05$)。

如图 7 所示, 室温春化处理 30 d、90 d 的春兰叶片可溶性蛋白质含量均显著低于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$), 室温春化处理 60 d 的春兰叶片可溶性蛋白质含量显著高于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。

4 ℃低温春化处理 15 d、30 d、90 d 的春兰叶片可溶性蛋白质含量均显著高于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d、60 d 的春兰花苞可溶性蛋白质含量均显著高于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$), 而室温春化处理 30 d 的春兰花苞可溶性蛋白质含量显著低于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。4 ℃低温春化处理 90 d 的春兰花苞可溶性蛋白质含量显著高于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d、30 d、60 d 的春兰假鳞茎可溶性蛋白质含量均显著低于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。4 ℃低温春化处理 30 d、60 d 的春兰假鳞茎可溶性蛋白质含量均显著低于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。室温春化处理 60 d、90 d 的春兰根可溶性蛋白质含量均显著高于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。

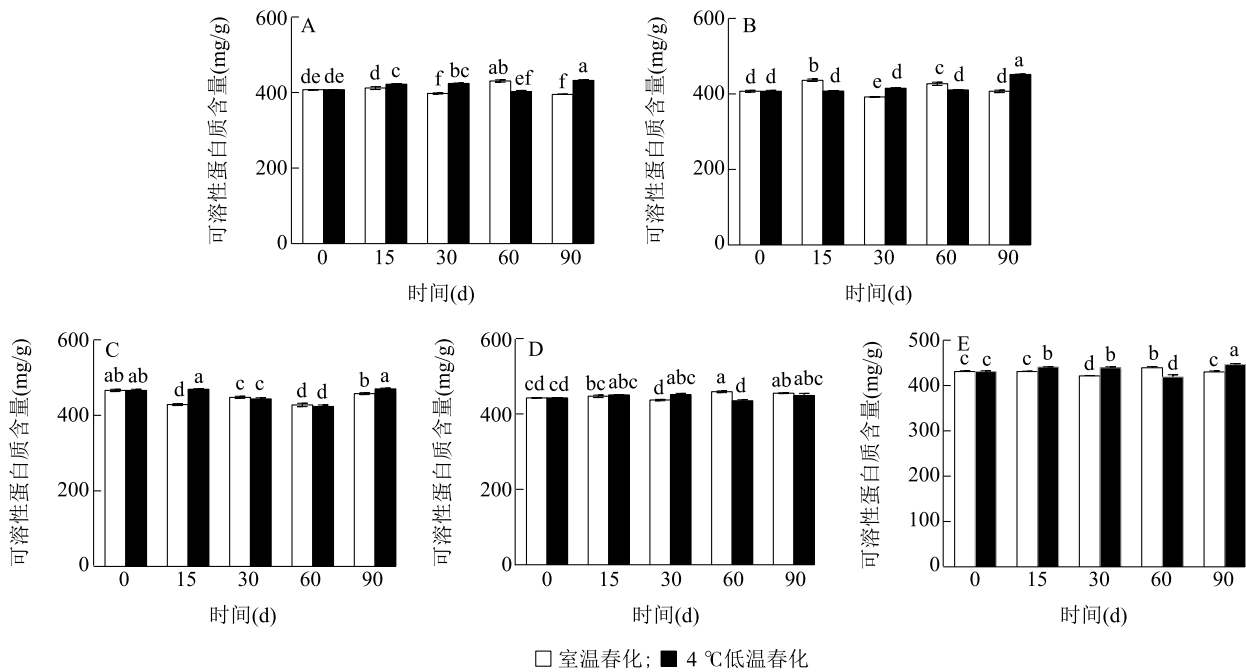
4 ℃低温春化处理 15 d、30 d、90 d 的春兰植株可溶性蛋白质含量均显著高于室温春化处理 15 d、30 d、90 d 的春兰植株 ($P < 0.05$), 而 4 ℃低温春化处理 60 d 的春兰植株可溶性蛋白质含量显著低于室温春化处理 60 d 的春兰植株 ($P < 0.05$)。



A: 叶片; B: 花苞; C: 假鳞茎; D: 根; E: 植株。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 不同春化温度和春化时间对春兰可溶性糖含量的影响

Fig.6 The effects of different vernalization temperatures and durations on the soluble sugar content of *Cymbidium goeringii*



A: 叶片; B: 花苞; C: 假鳞茎; D: 根; E: 植株。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 7 不同春化温度和春化时间对春兰可溶性蛋白质含量的影响

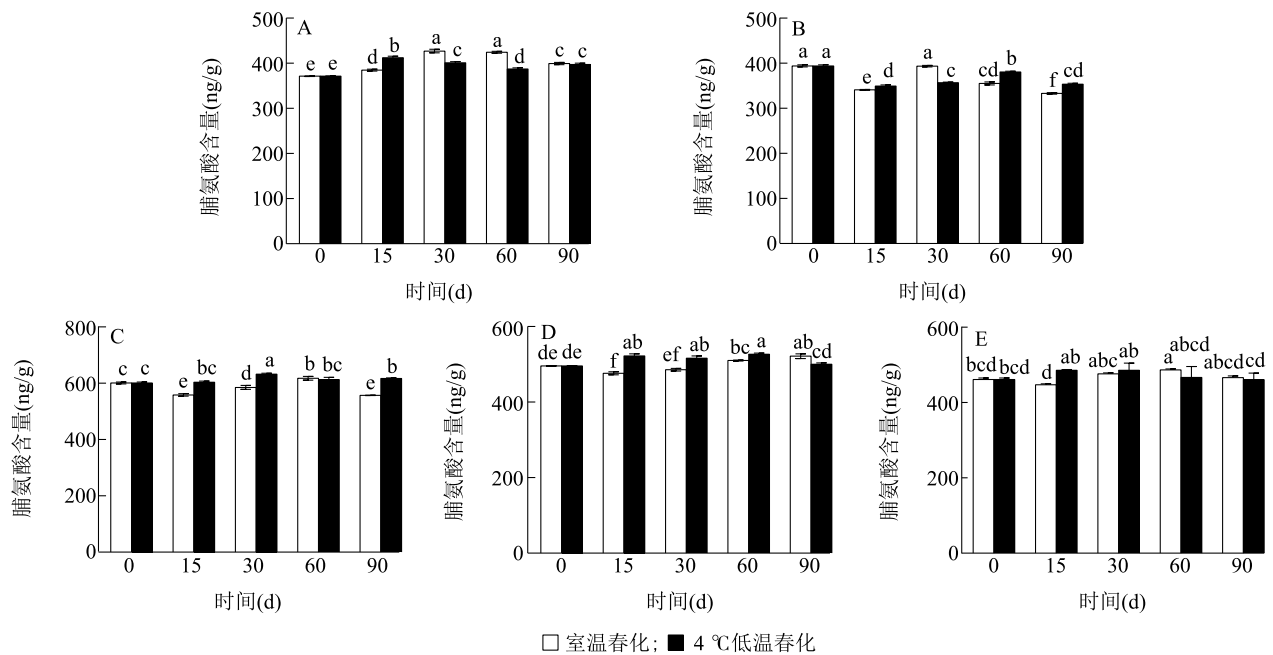
Fig.7 The effects of different vernalization temperatures and durations on the soluble protein content of *Cymbidium goeringii*

如图 8 所示,室温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰叶片脯氨酸含量均显著高于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、60

d、90 d 的春兰叶片脯氨酸含量均显著高于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d、60 d、90 d 的春兰花苞脯氨酸含量均显著低于未春化的

春兰花苞 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰花苞脯氨酸含量均显著低于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d、30 d、90 d 的春兰假鳞茎脯氨酸含量均显著低于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$), 而处理 60 d 的春兰假鳞茎脯氨酸含量显著高于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 30 d、90 d 的春兰假鳞茎脯氨酸含量均显著高于未春化的春兰假鳞茎 ($P <$

0.05)。室温春化处理 15 d 的春兰根脯氨酸含量显著低于未春化的春兰根 ($P < 0.05$), 而室温春化处理 60 d、90 d 的春兰根脯氨酸含量均显著高于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、60 d 的春兰根脯氨酸含量均显著高于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d 的春兰植株脯氨酸含量显著高于室温春化处理 15 d 的春兰植株 ($P < 0.05$)。



A: 叶片; B: 花苞; C: 假鳞茎; D: 根; E: 植株。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 8 不同春化温度和春化时间对春兰脯氨酸含量的影响

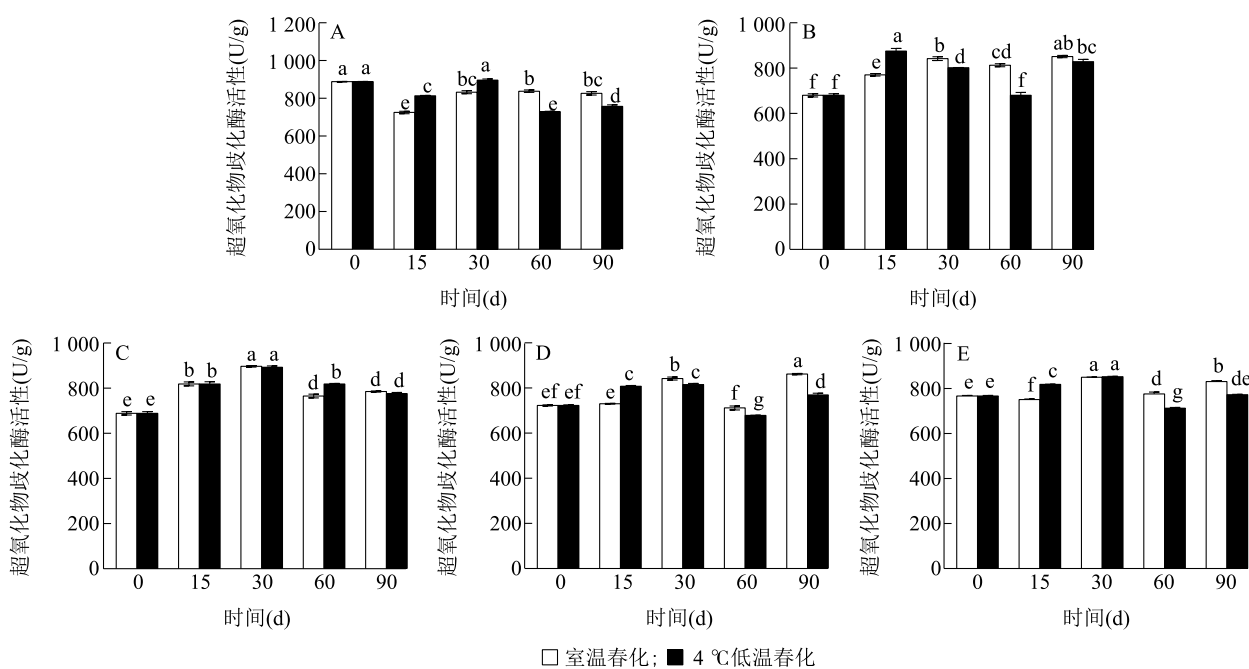
Fig.8 The effects of different vernalization temperatures and durations on the proline content of *Cymbidium goeringii*

2.6 不同春化温度和春化时间对春兰抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

由图 9 可知, 室温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰叶片超氧化物歧化酶活性均显著低于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、60 d、90 d 的春兰叶片超氧化物歧化酶活性均显著低于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰花苞超氧化物歧化酶活性均显著高于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、90 d 的春兰花苞超氧化物歧化酶活性均显著高于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰假鳞茎超氧化物歧化酶活性均显著高于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春

化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰假鳞茎超氧化物歧化酶活性均显著高于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。室温春化处理 30 d、90 d 的春兰根超氧化物歧化酶活性均显著高于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、90 d 的春兰根超氧化物歧化酶活性均显著高于未春化的春兰根 ($P < 0.05$), 而 4 °C 低温春化处理 60 d 的春兰根超氧化物歧化酶活性显著低于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。

4 °C 低温春化处理 15 d 的春兰植株超氧化物歧化酶活性显著高于室温春化处理 15 d 的春兰植株 ($P < 0.05$), 而 4 °C 低温春化处理 60 d、90 d 的春兰植株超氧化物歧化酶活性均显著低于室温春化处理 60 d、90 d 的春兰植株 ($P < 0.05$)。



□ 室温春化; ■ 4 °C 低温春化

A: 叶片; B: 花苞; C: 假鳞茎; D: 根; E: 植株。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 9 不同春化温度和春化时间对春兰超氧化物歧化酶活性的影响

Fig.9 The effects of different vernalization temperatures and durations on the superoxide dismutase activity of *Cymbidium goeringii*

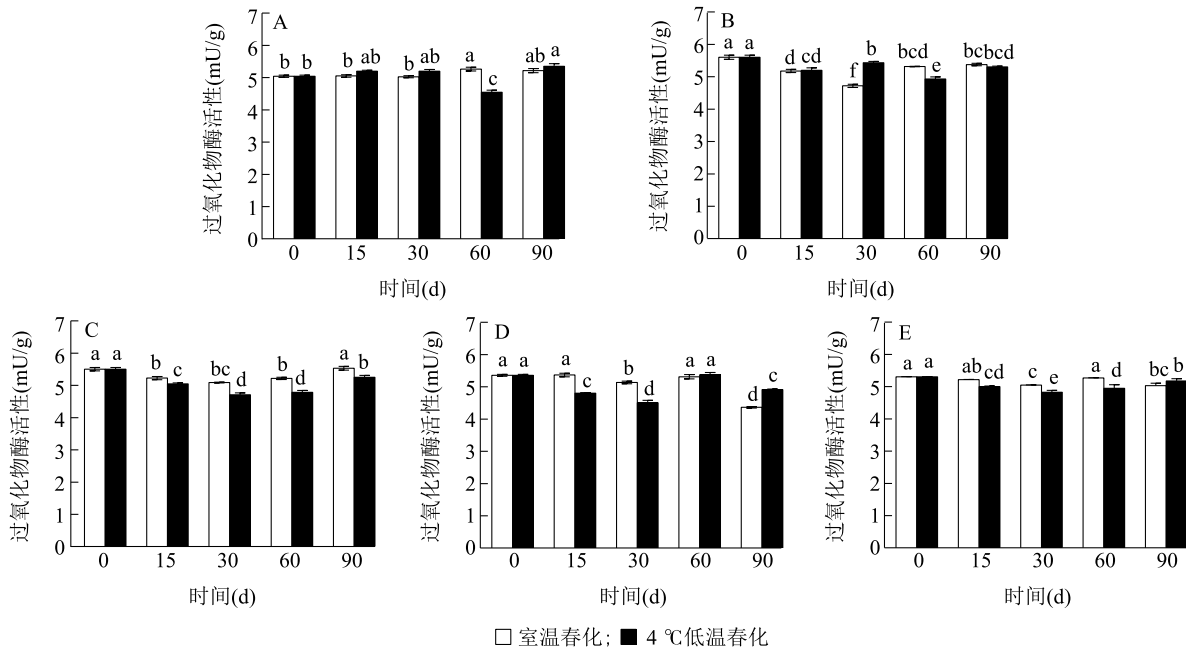
如图 10 所示,室温春化处理 60 d 的春兰叶片过氧化物酶活性显著高于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 60 d 的春兰叶片过氧化物酶活性显著低于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$), 而 4 °C 低温春化处理 90 d 的春兰叶片过氧化物酶活性显著高于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰花苞过氧化物酶活性均显著低于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰花苞过氧化物酶活性均显著高于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d 的春兰假鳞茎过氧化物酶活性显著低于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$), 而室温春化处理 30 d、60 d、90 d 的春兰假鳞茎过氧化物酶活性均显著高于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰假鳞茎过氧化物酶活性均显著低于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。室温春化处理 30 d、90 d 的春兰根过氧化物酶活性均显著低于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、90 d 的春兰根过氧化物酶活性均显著低于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。

4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、60 d 的春兰植株过氧化物酶活性均显著低于室温春化处理 15 d、30 d、60 d 的春兰植株 ($P < 0.05$)。

如图 11 所示,室温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰叶片过氧化氢酶活性均显著低于未春化的

春兰叶片 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、90 d 的春兰叶片过氧化氢酶活性均显著低于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$), 而 4 °C 低温春化处理 60 d 的春兰叶片过氧化氢酶活性显著高于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。室温春化处理 60 d、90 d 的春兰花苞过氧化氢酶活性均显著高于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰花苞过氧化氢酶活性均显著高于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d 的春兰假鳞茎过氧化氢酶活性显著低于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$), 而室温春化处理 30 d、60 d、90 d 的春兰假鳞茎过氧化氢酶活性均显著高于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 30 d、60 d、90 d 的春兰假鳞茎过氧化氢酶活性均显著高于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d 的春兰根过氧化氢酶活性显著低于未春化的春兰根 ($P < 0.05$), 而室温春化处理 30 d、60 d、90 d 的春兰根过氧化氢酶活性均显著高于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。4 °C 低温春化处理 15 d、30 d、60 d、90 d 的春兰根过氧化氢酶活性均显著高于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。

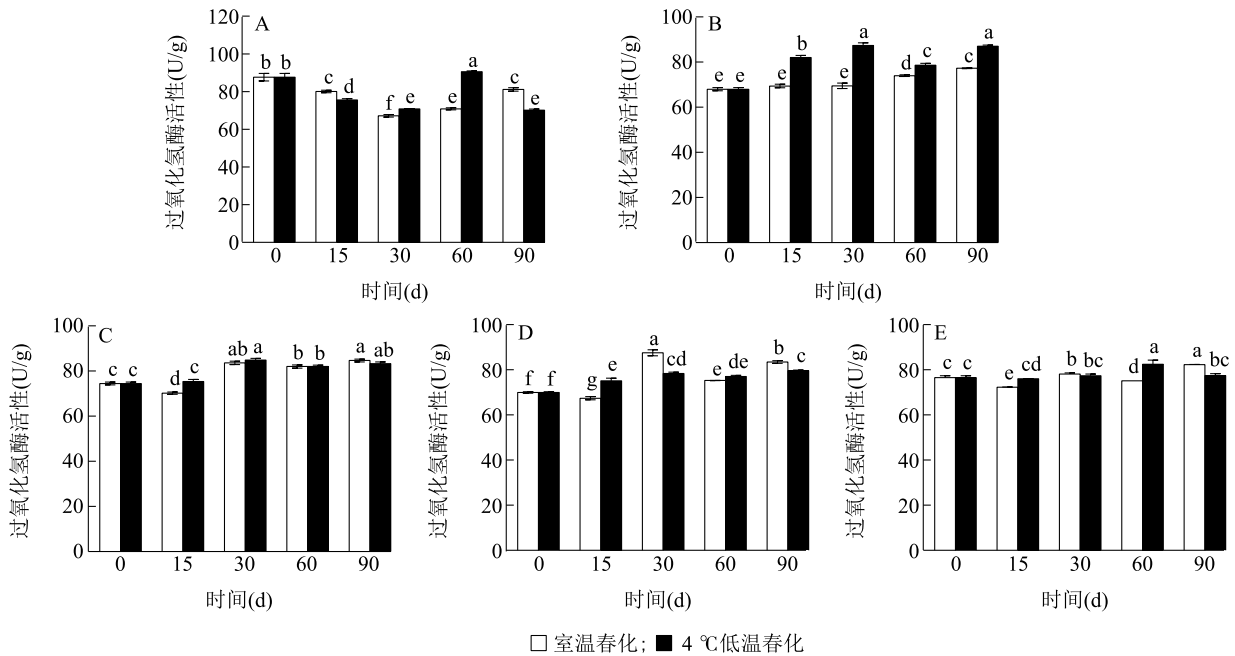
4 °C 低温春化处理 15 d、60 d 的春兰植株过氧化氢酶活性均显著高于室温春化处理 15 d、60 d 的春兰植株 ($P < 0.05$), 而 4 °C 低温春化处理 90 d 的



A: 叶片; B: 花苞; C: 假鳞茎; D: 根; E: 植株。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 10 不同春化温度和春化时间对春兰过氧化物酶活性的影响

Fig.10 The effects of different vernalization temperatures and durations on the peroxidase activity of *Cymbidium goeringii*



A: 叶片; B: 花苞; C: 假鳞茎; D: 根; E: 植株。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 11 不同春化温度和春化时间对春兰过氧化氢酶活性的影响

Fig.11 The effects of different vernalization temperatures and durations on the catalase activity of *Cymbidium goeringii*

春兰植株过氧化氢酶活性显著低于室温春化处理 90 d 的春兰植株 ($P < 0.05$)。

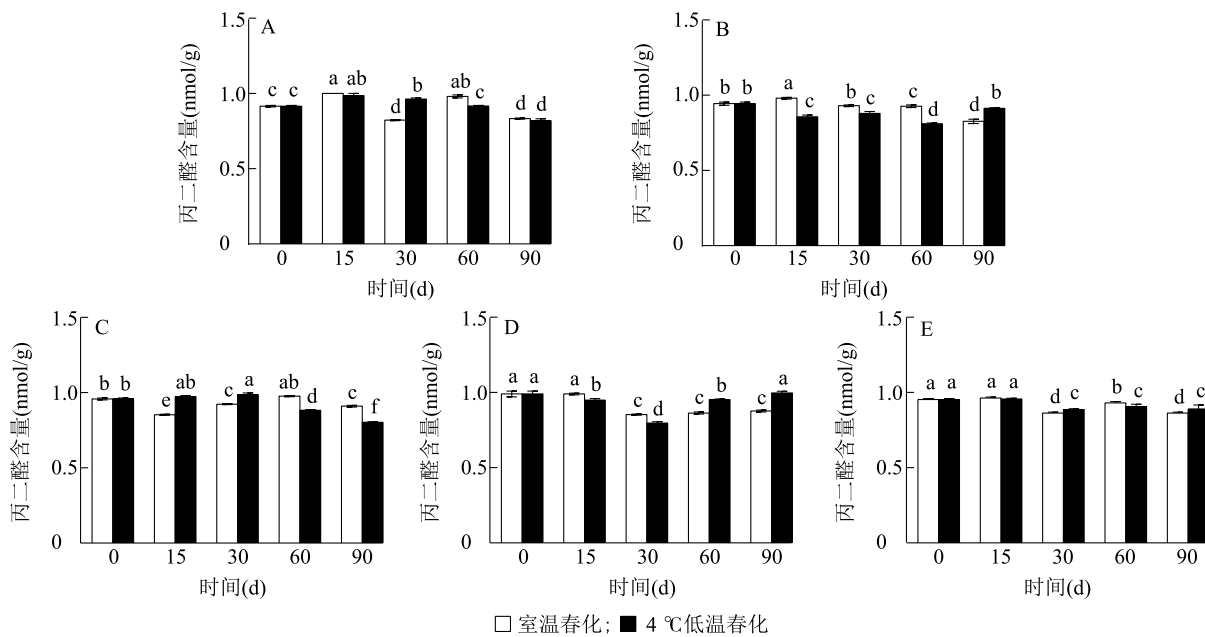
如图 12 所示, 室温春化处理 15 d、60 d 的春兰

叶片丙二醛含量均显著高于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$), 而室温春化处理 30 d、90 d 的春兰叶片丙二醛含量均显著低于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。

4 ℃低温春化处理 15 d、30 d 的春兰叶片丙二醛含量均显著高于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$), 而 4 ℃低温春化处理 90 d 的春兰叶片丙二醛含量显著低于未春化的春兰叶片 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d 的春兰花苞丙二醛含量显著高于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$), 而室温春化处理 60 d、90 d 的春兰花苞丙二醛含量均显著低于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。4 ℃低温春化处理 15 d、30 d、60 d 的春兰花苞丙二醛含量均显著低于未春化的春兰花苞 ($P < 0.05$)。室温春化处理 15 d、30 d、90 d 的春兰假鳞茎丙二醛含量均显著低于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。4 ℃低温春化处理 30 d 的春兰假鳞茎丙二

醛含量显著高于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$), 而 4 ℃低温春化处理 60 d、90 d 的春兰假鳞茎丙二醛含量均显著低于未春化的春兰假鳞茎 ($P < 0.05$)。室温春化处理 30 d、60 d、90 d 的春兰根丙二醛含量显著低于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。4 ℃低温春化处理 15 d、30 d、60 d 的春兰根丙二醛含量均显著低于未春化的春兰根 ($P < 0.05$)。

4 ℃低温春化处理 30 d、90 d 的春兰植株丙二醛含量均显著高于室温春化处理 30 d、90 d 的春兰植株 ($P < 0.05$), 而 4 ℃低温春化处理 60 d 的春兰植株丙二醛含量显著低于室温春化处理 60 d 的春兰植株 ($P < 0.05$)。



A: 叶片; B: 花苞; C: 假鳞茎; D: 根; E: 植株。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 12 不同春化温度和春化时间对春兰丙二醛含量的影响

Fig.12 The effects of different vernalization temperatures and durations on the malondialdehyde content of *Cymbidium goeringii*

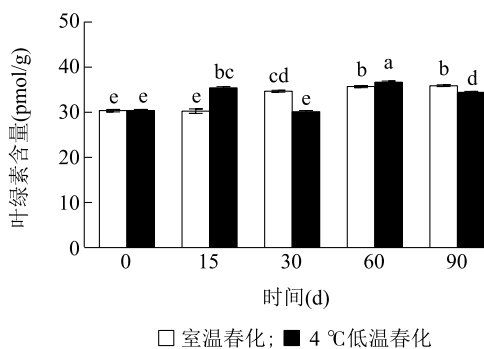
2.7 春化时间对春兰叶片叶绿素含量的影响

如图 13 所示, 室温春化处理 30 d、60 d、90 d 的春兰叶片叶绿素含量显著高于未春化的春兰叶片以及室温春化处理 15 d 的春兰叶片 ($P < 0.05$)。4 ℃低温春化处理 60 d 的春兰叶片叶绿素含量显著高于未春化的春兰叶片以及 4 ℃低温春化处理 15 d、30 d、90 d 的春兰叶片 ($P < 0.05$)。4 ℃低温春化处理 15 d、60 d 的春兰叶片叶绿素含量分别显著高于室温处理 15 d、60 d 的春兰叶片, 而 4 ℃低温春化处理 30 d、90 d 的春兰叶片叶绿素含量分别显著低于室温处理 30 d、90 d 的春兰叶片 ($P < 0.05$)。

2.8 春化时间与春兰生理生化指标的相关性分析

如图 14 所示, 室温春化条件下, 春兰春化时间与可溶性糖含量 (SS)、可溶性蛋白含量 (SP) 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 相关系数分别为 0.63、0.66; 春兰春化时间与脯氨酸含量、叶绿素含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.82、0.85; 春兰春化时间与过氧化物酶活性 (POD)、丙二醛含量 (MDA) 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 -0.80、-0.68。表明室温春化条件下, 春化时间对春兰渗透调节物质含量、抗氧化酶活性及光合能力具有显著影响。4 ℃低温春化条件

下,春化时间与过氧化氢酶活性(CAT)呈极显著正相关($P < 0.01$),相关系数为0.77。表明4℃低温春化条件下,春化时间对春兰抗氧化酶活性具有极显著影响。



图柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 13 不同春化温度和春化时间对春兰叶片叶绿素含量的影响

Fig.13 The effects of different vernalization temperatures and durations on the chlorophyll content in the leaves of *Cymbidium goeringii*

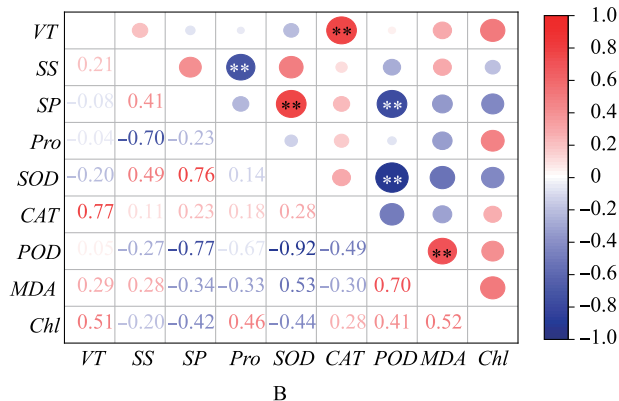
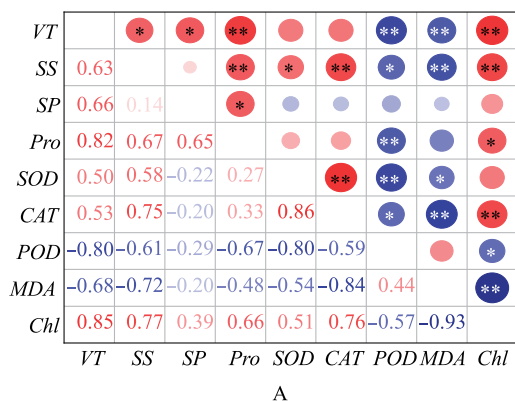


图 A 为室温春化;图 B 为 4℃低温春化。VT:春化时间;SS:可溶性糖含量;SP:可溶性蛋白含量;Pro:脯氨酸含量;SOD:超氧化物歧化酶活性;CAT:过氧化氢酶活性;POD:过氧化物酶活性;MDA:丙二醛含量;Chl:叶绿素含量。*表示在 0.05 水平显著相关,**表示在 0.01 水平极显著相关。

图 14 春化时间与春兰生理生化指标的相关性分析

Fig.14 Analysis of the correlation between vernalization duration and physiological and biochemical indicators of *Cymbidium goeringii*

脯氨酸作为重要的渗透保护物质,其含量可反映植物的抗逆能力^[23-24]。本研究发现,4℃低温春化处理 15 d 的春兰植株脯氨酸含量显著高于室温春化处理 15 d 的春兰植株($P < 0.05$)。表明 4℃低温春化能够促进春兰植株快速合成脯氨酸,保护细胞膜结构,在苦瓜中也有相似的响应模式^[25]。

3.2 春化温度和春化时间对春兰抗氧化酶活性、丙二醛含量的影响

丙二醛(MDA)作为植物细胞膜脂过氧化的产

3 结论与讨论

3.1 春化温度和春化时间对春兰渗透调节物质含量的影响

在低温春化过程中,可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)和脯氨酸(Pro)通过渗透调节和代谢调控帮助植物抵御低温胁迫^[18-20]。低温春化初期,植株通过主动积累可溶性糖提升细胞液浓度,增强抗寒能力以应对低温胁迫;低温春化中后期,茎尖分生组织感知春化信号,可溶性糖含量逐渐下降,植物从营养生长向生殖发育过渡^[21]。本研究中,4℃低温春化处理 90 d 的春兰植株可溶性糖含量显著低于室温春化处理的春兰植株($P < 0.05$),4℃低温春化处理 90 d 的春兰植株可溶性蛋白质含量均显著高于室温春化处理的春兰植株($P < 0.05$)。表明 4℃低温春化能够促进春兰植株中可溶性糖向可溶性蛋白质的转化,与前人研究结果^[22]相似。

物,其含量变化可有效反映细胞膜受氧化损伤的程度,丙二醛含量可用于评估逆境胁迫下植物膜系统稳定性及抗逆性^[26-33]。本研究结果表明,不同春化温度处理下 MDA 含量呈现显著差异。随着 4℃低温春化处理时间的延长,春兰植株丙二醛含量整体呈持续下降趋势;而随着室温春化处理时间的延长,春兰丙二醛含量则呈现出明显的波动。表明稳定的低温环境更有利于维持春兰细胞膜结构的完整性,而室温条件下,昼夜温度波动较大,可能导致春兰膜

系统遭受严重的氧化胁迫。

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)共同清除活性氧自由基,抵抗活性氧的侵害^[34]。本研究中,春兰的抗氧化酶系统对4℃低温春化呈现动态响应特征。4℃低温春化处理15 d、60 d、90 d的春兰叶片超氧化物歧化酶活性与4℃低温春化处理15 d、30 d、90 d的春兰叶片过氧化氢酶活性均显著低于未春化的春兰($P < 0.05$)。其中,4℃低温春化处理30 d的春兰叶片超氧化物歧化酶活性达到最大值,4℃低温春化处理60 d的春兰叶片过氧化氢酶活性达到最大值,符合低温诱导的活性氧清除系统激活规律。4℃低温春化处理15 d的春兰叶片超氧化物歧化酶活性骤降,可能是由于在这个阶段,春兰中的能量代谢转向渗透调节物质合成,导致抗氧化酶合成能力降低,与前人研究结论^[35]一致。该结果揭示了春兰通过抗氧化酶活性的动态变化来实现低温胁迫下的平衡。在低温胁迫前期,春兰主要依靠超氧化物歧化酶与过氧化氢酶的协同作用清除活性氧,减少氧化损伤;而在低温胁迫后期,随着能量代谢的重新分配,植物通过抑制代谢活动降低能量消耗,减少对抗氧化酶的依赖,同时利用渗透调节物质维持细胞的渗透压和稳定性。这种独特的适应策略使春兰能够在长期低温胁迫下保持细胞的稳态。

3.3 春化温度和春化时间对春兰叶绿素含量的影响

叶绿素作为光合作用的关键色素,其含量变化可直观反映植物对低温胁迫的光合适应能力^[36]。本研究结果表明,4℃低温春化处理15 d、60 d、90 d的春兰叶片叶绿素含量显著高于未春化的春兰叶片($P < 0.05$),这可能是由于低温诱导细胞脱水,导致叶绿素含量浓缩^[37];4℃低温春化处理30 d的春兰叶片叶绿素含量与未春化的春兰叶片无显著差异($P > 0.05$)。表明4℃低温未对春兰光合能力造成不可逆损伤,春兰能够通过自身调节机制维持光合器官的结构与功能完整性。该适应性机制可能是春兰长期进化过程中形成的低温响应策略。

参考文献:

[1] WANG H Z, WU Z X, LU J J, et al. Molecular diversity and relationships among *Cymbidium goeringii* cultivars based on inter-simple sequence repeat (ISSR) markers[J]. *Genetica*, 2009, 136:

391-399.

- [2] 鲜小林,陈睿. 温度与光强对高山杜鹃催花期间花芽营养物质积累的影响[J]. *西北植物学报*, 2015, 35(5):991-997.
- [3] 宋杨,窦连登,张红军. 高等植物成花诱导调控的分子和遗传机制[J]. *植物生理学报*, 2014, 50(10):1459-1468.
- [4] XI Y, PARK S R, KIM D H, et al. Transcriptome and epigenome analyses of vernalization in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant Journal*, 2020, 103:1490-1502.
- [5] LIU X F, HUANG Y, LI F, et al. Genetic diversity of 129 spring orchid (*Cymbidium goeringii*) cultivars and its relationship to horticultural types as assessed by EST-SSR markers[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 174:178-184.
- [6] YANG F X, ZHU G F, WANG Z, et al. Integrated mRNA and microRNA transcriptome variations in the multi-tepal mutant provide insights into the floral patterning of the orchid *Cymbidium goeringii* [J]. *BMC genomics*, 2017, 18(1):1-24.
- [7] XIANG L, CHEN Y, CHEN L P, et al. B and E MADS-box genes determine the perianth formation in *Cymbidium goeringii* Rchb.f. [J]. *Physiologia Plantarum*, 2018, 162:353-369.
- [8] 赵虎,封宸,邢海,等. 春兰提前开花的栽培试验[J]. *浙江农业科学*, 2008(1):37-38.
- [9] YANG F X, ZHU G F, WEI Y L, et al. Low-temperature-induced changes in the transcriptome reveal a major role of *CgSVP* genes in regulating flowering of *Cymbidium goeringii* [J]. *BMC genomics*, 2019, 20:53.
- [10] 刘晓芬,凌晓祺,向理理,等. 温度和赤霉素对春兰开花的调控[J]. *浙江农业学报*, 2023, 35(2):355-363.
- [11] 陈满霞,蒋玉蓉,於金生. 小麦春化作用研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(24):6-12.
- [12] 徐春梅,邹娅,刘自刚,等. 白菜型冬油菜萌动种子低温春化的生理生化特征[J]. *中国农业科学*, 2020, 53:929-941.
- [13] 杨柳. 春化对甘蓝型油菜生理指标及其转录组影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2022.
- [14] 孔小平. 大白菜春化特性及其生理生化指标的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [15] 陈华,郑晨华,李爱萍,等. 春化时间对蚕豆幼苗若干生理生化指标的影响[J]. *福建农业学报*, 2012, 27(8):869-873.
- [16] 栗延茹. 有效低温积累对青花菜春化及花芽分化的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2017.
- [17] 汤绍虎,罗充. 植物生理实验教程[M]. 重庆:西南师范大学出版社, 2012.
- [18] LI R S F, FUKUDA K. Interactive effects of salt and alkali stresses on seed germination, germination recovery, and seedling growth of a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae) [J]. *South African Journal of Botany*, 2010, 76:380-387.
- [19] 蒲媛媛. 我国北方甘蓝型冬油菜抗寒性评价及冷冻胁迫下转录组分析[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2019.
- [20] 权威,薛文通,赵天瑶,等. 植物对低温胁迫的响应机制研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(2):14-22.
- [21] LIU X H, WANG Q, GU J H, et al. Vernalization of oriental hy-

- brid lily 'Sorbonne': changes in physiology metabolic activity and molecular mechanism [J]. *Molecular Biology Reports*, 2014, 41: 6619-6634.
- [22] 宋 峥. 油菜花芽分化调节机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [23] 刘娥娥, 宗 会, 郭振飞, 等. 干旱、盐和低温胁迫对水稻幼苗脯氨酸含量的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2000, 8(3): 235-238.
- [24] 王若梦, 董宽虎, 李钰莹, 等. 外源植物激素对 NaCl 胁迫下苦马豆苗期脯氨酸代谢的影响[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 189-195.
- [25] 杜文丽, 陈中钡, 许端祥, 等. 低温胁迫下苦瓜叶片转录组差异基因分析及生理响应特征[J]. *核农学报*, 35(2): 338-348.
- [26] MITTLER R, VANDERAUWERA S, GOLLERY M, et al. Reactive oxygen gene network of plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2004, 9: 490-498.
- [27] 胡永波, 雷雨田, 杨永森, 等. 芸苔素内酯喷施对黄瓜幼苗耐旱性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(9): 195-203.
- [28] 戚金存, 刘大泉, 刘 泓, 等. 干旱胁迫及复水对槟榔幼苗形态和生理特性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(4): 615-624.
- [29] 张赞培, 谷月营, 尚旭岚, 等. 自然低温下 23 个青钱柳家系耐寒性评价[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(4): 85-92.
- [30] 张 帆, 刘 博, 石 玉, 等. 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗生长及生理特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(5): 186-191.
- [31] 李 明, 颜嘉丽, 石铭福, 等. 外源 2,4-表油菜素内酯对碱性盐胁迫下马铃薯根系生长、生理特性及土壤酶活性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(3): 394-402.
- [32] 张 婷, 张文杰, 石梦云, 等. 外源过氧化氢对草莓花芽生理生化的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(21): 168-173.
- [33] ESIM N, TIRYAKI D, KARADAGOGLU O, et al. Toxic effects of boron on growth and antioxidant system parameters of maize (*Zea mays* L.) roots[J]. *Toxicology and Industrial Health*, 2013, 29: 800-805.
- [34] QIU Z B, LI J T, ZHANG M M, et al. He-Ne laser pretreatment protects wheat seedlings against cadmium-induced oxidative stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 88: 135-141.
- [35] 闫利恒, 代海芳, 贺 杰. 小麦春化脱春化、抗寒处理后 POD 活性变化的研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(9): 99-104.
- [36] APPENROTH K J, KRECH K, KERESZTES Á, et al. Effects of nickel on the chloroplasts of the duckweeds *Spirodela polyrrhiza* and *Lemna minor* and their possible use in biomonitoring and phytoremediation[J]. *Chemosphere*, 2010, 78: 216-223.
- [37] 宋家壮, 李萍萍, 付为国. 水分胁迫及复水对藜草生理生化特性的影响[J]. *草业学报*, 2021, 21(2): 62-69.

(责任编辑:成纾寒)