

外源 ABA 对低温胁迫下烤烟幼苗生理指标的影响

梁琼月^{1,2}, 潘明君^{1,3}, 尹永强⁴, 韦建玉⁵, 沈方科¹, 贾海江⁵, 唐新莲^{1,2*}

(1. 广西大学农学院, 南宁 530004; 2. 广西大学植物科学国家级实验教学示范中心, 南宁 530004; 3. 河南省周口市商水县第一高级中学, 河南 周口 466100; 4. 广西壮族自治区烟草公司河池市公司, 广西 河池 547000; 5. 广西中烟工业有限责任公司, 南宁 530001)

摘要: 探讨脱落酸(ABA)对烤烟幼苗抗寒性的影响, 以期为提高烤烟苗期抗寒性及抗寒栽培提供理论依据。以云烟 87 为材料, 于 15℃低温胁迫下叶面喷施 ABA 处理, 测定烤烟幼苗叶片可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸和丙二醛含量及抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT)的活性、叶绿素含量及叶绿素荧光参数等生理指标, 分析烤烟幼苗的抗寒性。低温胁迫与对照相比, 喷施 ABA 可显著提高烤烟幼苗可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量, 减缓丙二醛(MDA)的积累, 同时抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT)的活性显著提高; 有效减缓叶绿素降解速率, 减轻低温对烤烟光合作用的影响; ABA 处理提高了烤烟幼苗根系活力, 整株生物量维持在较高水平。低温胁迫下叶面喷施 ABA 可提高烤烟幼苗的抗寒能力。

关键词: 烤烟; 低温胁迫; 脱落酸; 生理指标

中图分类号: S573

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2023)05-0051-05

Effects of Exogenous ABA on Physiology Index of Tobacco Seedling under Cold Stress

LIANG Qiongyue^{1,2}, PAN Mingjun^{1,3}, YIN Yongqiang⁴, WEI Jianyu⁵, SHEN Fangke¹, JIA Haijiang⁵, TANG Xinlian^{1,2*}

(1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004; 2. National Demonstration Center for Experimental Plant Science Education, Guangxi University, Nanning 530004; 3. The First Senior Middle School of Shangshui County, Zhoukou 466100; 4. Hechi Tobacco Company, Hechi 547000; 5. China Tobacco Guangxi Industrial Co., Ltd., Nanning 530001, China)

Abstract: In this experiment, the effect of ABA on the cold resistance of tobacco seedlings was investigated to provide a theoretical basis for improving cold-resistance during seeding stage and cold-resistance breeding. YY 87 was selected as the material, ABA was sprayed on the leaves under 15℃ temperature of cold stress. The physiological indexes, including content of soluble protein, soluble sugar, proline, malondialdehyde(MDA), SOD, POD, CAT activity, content of chlorophyll and chlorophyll fluorescence parameters were detected to analysis the cold resistance of tobacco seedling. Spraying ABA under cold stress conditions significantly increased the contents of soluble protein, soluble sugar, and proline compared to the control. It also slowed down the accumulation of MDA content, while increase the activity of SOD, POD, CAT significantly, stop the decrease of the content of chlorophyll effectively, which would reduce the influence of low temperature on photosynthesis of plant leaves. The root activity was also improved, which result in maintaining the biomass accumulation in high level of tobacco seedlings. Spraying the ABA on tobacco under low temperature can effectively raise the ability of cold resistance of tobacco seedling.

Key words: Tobacco; Cold stress; ABA; Physiology index

收稿日期: 2020-04-30

基金项目: 广西壮族自治区科技厅重点研发计划项目(桂科 AB16380160); 广西壮族自治区烟草专卖局(公司)项目(桂烟(科【2013】4号(2013-17))); 广西中烟工业有限责任公司科技项目(2020450000340009)

作者简介: 梁琼月(1987-), 女, 实验师, 博士, 主要从事作物环境及生态方向研究。

通讯作者: 唐新莲, 女, 博士, 副教授, E-mail: txl@gxu.edu.cn

烤烟原产于亚热带, 气温是烤烟生长发育及其产质量形成的主要限制因子之一。烤烟最适生长温度为 25~28℃, 当温度低于 13℃时出苗率低, 苗期生长缓慢甚至停止生长, 当温度降到 1~2℃时可致幼苗死亡^[1]。低温胁迫严重影响烟苗质量, 进而影响烤烟后期的生长发育, 更制约着优质烟叶的生产^[2-3]。目前, 广西烟区普遍存在的一

个问题是冬季育苗期正处于低温寡照季节,栽培遇倒春寒和秋季霜冻等低温的不良影响。因此,如何提高烤烟的抗寒性是生产上亟须解决的一个问题。脱落酸(ABA)被认为是抑制植物生长发育和促进器官衰老脱落的激素,它是植物的抗逆诱导因子,因而被称为植物的“胁迫激素”^[4-5]。脱落酸在植物应对干旱、高盐、低温和病虫害等逆境胁迫中发挥着重要的作用^[6]。研究表明,植物受低温胁迫时,外源 ABA 可诱导植物内源 ABA 的合成及运输,促进水分从根系向叶片运输,提高细胞膜透性并促进气孔关闭以减少水分的散失;ABA 可诱导植物叶片蔗糖合成酶的活性,促进蔗糖的合成^[7];增加可溶性总糖、脯氨酸、可溶性糖、钾离子等渗透调节物质的含量和积累,提高植物体内 SOD、POD 和 CAT 等保护酶的活性,降低膜脂过氧化程度,保护膜结构的完整性,增强植物抗低温能力^[8]。ABA 能显著提高甘蔗^[9]、油棕^[10]及雷公藤^[11]等的抗寒性。本试验针对烤烟生产中存在的低温危害问题,以云烟 87 幼苗为材料,研究外源 ABA 对烤烟幼苗抗寒性的作用效果及其生理基础,旨在为 ABA 在烤烟生产上的应用提供理论依据,这对提高烤烟抗寒能力、促进烤烟产业发展具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试烤烟品种:云烟 87,由广西壮族自治区烤烟公司河池市公司提供。ABA 为国药集团化学试剂有限公司生产的固体粉剂。试验在广西大学农学院土化楼人工气候室进行。

1.2 试验方法

选取大小一致且饱满的烤烟种子于育苗漂浮盘中进行标准化育苗,在 25℃下培养。待烟苗长到 5 叶 1 心时进行试验处理。试验设 3 个处理,CK₁、CK₂、ABA,其中 ABA 处理对烟苗叶面每盘定量喷施 0.5 mg/L ABA 100 mL,对照 CK₁、CK₂ 喷施等量去离子水。每处理 3 次重复,每个重复为 2

个育苗盘(52 cm×33 cm×6.5 cm,160 孔/盘)的烟苗,采用随机区组设计,处理后常温放置 24 h,然后对照 CK₁继续在 25℃光照培养室里培养,对照 CK₂与 ABA 处理转入 15℃人工气候室中进行低温胁迫处理,各处理光周期均为 12 h/d,光照强度为 2 500 lx,湿度 70%。期间水肥管理均保持一致。于处理后第 1 天,采用 PAM-2500 便携式叶绿素荧光仪(泽泉科技有限公司,农学院大型仪器共享平台)测定植株心叶外围第二片展开叶的叶绿素荧光参数。于处理后第 5 d,取心叶外围第二片展开叶测定丙二醛含量(硫代巴比妥酸法)、脯氨酸含量(酸性茚三酮法)、叶绿素含量(Arnon 浸提法)、可溶性蛋白含量(考马斯亮蓝 G-250 法)、可溶性糖含量(蒽酮比色法)和根系活力(TTC 法)、过氧化物酶(POD)活性(愈创木酚氧化法)、过氧化氢酶(CAT)活性(紫外分光光度法)、超氧化物歧化酶(SOD)活性(使用南京建成公司试剂盒)等各指标^[12]。处理后第 10 d,每个处理采集 30 株烟苗(每个小区 10 株),洗净后擦干测定根鲜重和地上部鲜重,然后分别于 105℃烘干 48 h,重量至恒重,测定根干重、地上部干重和根冠比(植物地下部分与地上部分的干重比值)。

1.3 统计分析

采用 Excel 2010 软件整理数据和制作图表,SPSS 21.0 软件进行统计和方差分析。多重比较用 Duncan’s 法。

2 结果与分析

2.1 ABA 对低温胁迫下烤烟叶片生理指标的影响

可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸是植物细胞内重要的渗透调节物质,对抗低温胁迫时起到平衡细胞代谢的作用,被认为是提高植物抗寒性的重要指标之一^[13]。ABA 处理烤烟叶片受低温胁迫后可溶性蛋白和可溶性糖含量较对照(CK₁和 CK₂)分别显著增加了 15.7%、11.4% 和 36.5%、33.3%(表 1),而 CK₂处理烟叶中可溶性蛋白和可溶性糖含量较 CK₁虽有所提高但未达差异显著水

表 1 脱落酸(ABA)对低温胁迫下烤烟幼苗叶片生理指标的影响

处理	可溶性蛋白含量 (mg/g·FW)	可溶性糖含量 (%)	脯氨酸含量 (ug/g·FW)	MDA 含量 (umol/g·FW)	SOD 活性 (U/g·FW)	POD 活性 (U/g·FW)	CAT 活性 (U/g·FW)
CK ₁	46.63±1.83b	3.81±0.01b	2.87±0.04c	5.04±0.02c	19.15±0.78b	0.26±0.01a	0.27±0.02a
CK ₂	48.42±1.01b	3.90±0.03b	6.61±0.09b	7.20±0.00a	14.24±0.34c	0.16±0.01c	0.21±0.01b
ABA	53.95±0.94a	5.20±0.03a	9.06±0.02a	6.46±0.01b	28.79±0.92a	0.20±0.02b	0.26±0.01a

注:表中数据为“平均值±标准误”,同列数据后字母不同表示差异显著(P<0.05),下同

平;CK₁、CK₂和ABA处理间烟叶脯氨酸含量均达差异显著水平,以ABA处理最高,分别较CK₁和CK₂提高了215.7%和37.1%。可见,ABA处理烟叶通过提高体内渗透调节物质来增加渗透调节能力,降低低温对细胞的损害,进而提高了烤烟幼苗对冷害的适应能力。

丙二醛(MDA)是膜脂氧化的终产物,其含量高低反映膜脂受伤害的程度。受低温胁迫,ABA和CK₂处理的MDA含量较CK₁均显著上升,可见低温使烤烟叶片细胞膜受损,导致体内MDA含量增加,而ABA处理升高的量却低于CK₂,ABA处理烟叶MDA含量较CK₂降低9.0%,可见喷施ABA可减轻低温对烤烟幼苗的膜脂过氧化作用,减轻低温胁迫对烟苗的伤害。

植物体内抗氧化酶(SOD、POD和CAT)及其他酶类相互协调,有效清除代谢过程中产生的活性氧,防止活性氧引起膜脂过氧化及其他伤害过程。本试验中,低温胁迫处理显著降低了CK₂烤烟叶片抗氧化酶活性,其中SOD、POD和CAT较正常培养对照组(CK₁)分别降低了25.6%、38.5%和22.2%(表1);与正常培养(CK₁)相比,喷施ABA低温处理的烤烟叶片SOD、POD和CAT三种抗氧化酶活性均维持较高水平,其中SOD活性提高了50.3%,POD和CAT活性均有所降低,POD降低了20.1%,差异达显著水平;但CAT活性下降差异未达显著水平;而与低温处理对照(CK₂)相比,喷施ABA低温处理,在不同程度上减缓了抗氧化酶活性的降低,SOD、POD和CAT三种抗氧化酶活性均

显著高于CK₂处理,分别提高102.2%、22.0%和22.8%。说明喷施ABA能激活烤烟植株抗氧化酶活性,有效降低低温胁迫造成的氧化损害。

2.2 ABA对低温胁迫下烤烟叶片叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响

低温胁迫引起叶绿体膜脂发生过氧化作用,叶绿体的结构和功能被破坏,叶绿素合成受到抑制,进而影响植物对光能的吸收、传递和转换。由表2可见,受低温胁迫,CK₂处理叶绿素a含量、叶绿素b含量和叶绿素总量均显著下降,较CK₁分别降低了16.9%、20.7%和17.2%,叶绿素b的下降速度高于叶绿素a。喷施ABA可以缓解叶绿素的降解,ABA处理烤烟叶片叶绿素a含量的降低值较CK₁未达差异显著水平,而叶绿素b和叶绿素总量较CK₁均显著降低,分别降低了20.7%和12.7%,但其显著增加了叶绿素a/b的值,增加量达11.6%。同时低温胁迫使CK₂烤烟叶片的最大荧光(F_m)、光化学量子效率(F_v/F_m)、光化学量子产量(Y(II))、表观电子传导率(ETR)与常温对照(CK₁)相比显著降低,初始荧光(F_o)则显著升高。可见低温抑制了PSII系统的电子传递,使PSII吸收的光能转化为化学能的比例降低。喷施ABA处理后,在低温胁迫下,F_m、F_v/F_m、Y(II)和ETR与低温对照(CK₂)相比显著升高,分别升高了4.6%、8.6%、188.9%和96.3%,而F_o显著降低,但与CK₁相比差异不显著。可见,ABA可一定程度上缓解烤烟幼苗叶绿素合成系统的伤害及光合抑制现象,增加烤烟幼苗的抗性。

表2 脱落酸(ABA)对低温胁迫下烤烟幼苗叶绿素荧光参数的影响

处理	叶绿素a (mg/g)	叶绿素b (mg/g)	叶绿素总量 (mg/g)	叶绿素a/b	初始荧光	最大荧光	光化学量子 效率	光化学量子 产量	表观电子传 导率
CK ₁	0.89±0.01a	0.29±0.00a	1.18±0.01a	3.10±0.02c	0.28±0.01b	1.21±0.02a	0.77±0.01a	0.26±0.05a	21.50±1.15a
CK ₂	0.74±0.03b	0.23±0.01b	0.97±0.03b	3.20±0.01b	0.33±0.03a	1.09±0.00c	0.70±0.03b	0.09±0.05b	10.75±0.09b
ABA	0.80±0.01ab	0.23±0.01b	1.03±0.01b	3.46±0.07a	0.27±0.01b	1.14±0.04b	0.76±0.00a	0.26±0.03a	21.10±2.65a

2.3 ABA对低温胁迫下烤烟幼苗生物量的影响

由表3可知,低温胁迫可降低烤烟幼苗根系活力,CK₂和ABA处理根系活力均显著低于正常培养对照(CK₁),分别降低了63.3%和25.2%,但喷

施ABA处理的幼苗根系活力与低温对照(CK₂)相比增加显著,增加了103.8%。同时低温胁迫显著降低烤烟幼苗地上部和根系干物质的积累量,CK₂、ABA处理烤烟幼苗地上部干重与地下部干

表3 脱落酸(ABA)对低温胁迫下烤烟幼苗根系活力和生物量的影响

处理	根系活力 (ugTTF/gFW/h)	地上部干重 (g/株)	根干重 (g/株)	生物量 (g/株)	根冠比
CK ₁	197.65±8.45a	0.22±0.03a	0.019±0.01a	0.234±0.02a	0.097±0.00a
CK ₂	72.51±2.09c	0.08±0.00c	0.003±0.00c	0.086±0.00c	0.041±0.01b
ABA	147.78±5.01b	0.15±0.01b	0.009±0.00b	0.159±0.01b	0.057±0.00b

重分别比CK₁降低了63.4%、31.8%和84.2%、52.6%,整株生物量则比CK₁分别降低了63.3%、32.1%,根冠比分别比CK₁降低了57.7%、24.7%。ABA处理后,烤烟幼苗的地上部和根干重及整株生物量均显著高于CK₂,其中以根干重增加量最大,达200.0%,而根冠比差异不显著。说明低温胁迫抑制了烤烟幼苗地上部和根系的生长,而ABA可降低低温胁迫对烤烟幼苗生长的抑制。

3 讨论

当植物受到冷害胁迫时细胞膜系统最先受到冷害,表现为细胞膜破损,胞内溶质外渗,进而引起细胞代谢失调,活性氧大量积累,最终导致膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)的积累^[14]。同时,MDA大量累积使得膜透性增大,电解质外渗增强,植物细胞膜受到严重损害^[15-16]。黄杏研究表明,随着低温胁迫加强,甘蔗叶片MDA含量也随之升高,当抗寒机制启动后,MDA含量随着甘蔗抗寒性的增加而逐渐下降^[17]。研究表明,MDA含量高低与植物的抗寒能力呈负相关^[17-18]。而在低温胁迫下,植物体可以通过调控相关的代谢途径产生一些渗透调节物质,以提高细胞液浓度,降低细胞的冰点,维持酶结构的稳定^[19],可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸是植物体内3种重要的渗透调节物质,它们的含量与植物的抗逆性呈正相关^[20]。本研究结果表明,烤烟受低温胁迫,叶片积累MDA的同时,可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸的含量也增加,说明烤烟可自身调节并启动防御机制来缓解冷害胁迫,喷施ABA可进一步提高可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸在烤烟叶片中的积累量,这与在油棕^[10]、甘蔗^[17]和山茶花^[20]上的研究结果一致,说明ABA可诱导植物体内渗透调节物质可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸的累积,提高烤烟幼苗的抗冷性。

过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)作为植物体内的重要保护酶,在清除自由基中起重要作用,保护酶系统防御能力的变化是这几种酶彼此协调的综合结果。植物体内高水平的抗氧化酶活性可减轻膜脂的过氧化程度,缓解低温伤害^[16]。本研究结果表明,低温胁迫导致烤烟叶片SOD、POD、CAT活性降低,使得体内活性氧自由基大量积累进而代谢紊乱,抗性降低。而喷施ABA处理后,在低温胁迫下SOD、CAT、POD活性较CK₂出现不同程度的升高,表明ABA在诱导抗氧化酶活性、减轻膜脂过氧化

伤害、提高烤烟幼苗抗冷性上具有显著效果。这与黄杏^[17]研究得出ABA能够不同程度地提高抗氧化酶CAT、POD和SOD活性的结论相似。

低温胁迫下植物体内活性氧的代谢失调还会引起生物膜结构和叶绿体结构受损,导致叶绿素含量下降,而叶绿素含量的高低和植株抗氧化能力强弱有密切关系^[21]。叶绿素是植物叶绿体中进行光合作用的主要色素,叶绿素的含量直接影响植物的光合作用能力,叶绿素含量也是评价逆境对光合作用器官伤害程度的重要指标^[22]。本研究结果显示,低温胁迫下烤烟幼苗叶绿素总量、叶绿素a含量、叶绿素b含量均显著下降,这是因为低温降低了叶绿体色素合成酶的活性,抑制了叶绿体的合成;此外低温还使叶绿素a/b值增大,这是因为低温胁迫下叶绿素b的降解速度大于叶绿素a所致^[23]。而喷施ABA处理可提高叶绿素a含量和叶绿素总量,显著提高叶绿素a/b的值。叶绿素荧光参数反映植物光系统PSII对光能的吸收、传递和耗散情况,为植物光合能力的内在反映^[23]。在低温胁迫下电子传递受阻,激发能过剩,产生三线态的叶绿素分子,这一分子能与氧反应产生具有相当破坏力的单线态氧,进而氧化破坏胡萝卜素和叶绿素等,分别引起PSII受体侧和供体发生侧光抑制,最终导致PSII反应中心部分失活或伤害,使得F_m、F_v/F_m、ETR下降,F_o上升,从而不利于叶片把捕获的光能转化为化学能,造成叶绿体功能紊乱^[24-25]。本研究表明,低温胁迫下烤烟幼苗的F_m、F_v/F_m、Y(II)、ETR均有所下降,F_o相对升高,这说明低温胁迫破坏了叶绿体结构,并导致了光抑制,破坏了PSII系统,抑制了PSII的电子传递,使PSII吸收的光能转化为化学能的比例降低。而喷施ABA显著提高低温胁迫下烤烟叶片的F_m、F_v/F_m、ETR,降低F_o,提高PSII作用中心活性,缓解叶绿素的降解速度,减小低温对植物叶片光合作用的影响,增强烟苗叶片的抗寒能力。这与李琦瑶^[15]和崔翠等^[23]的研究结果一致。

根系活力是一种客观反映根系生命活动的指标,根系活力的大小体现了根系对逆境胁迫的耐受程度,直接影响地上部的生长和发育水平^[26-27]。苗期低温对烤烟幼苗根系造成一定的伤害,从而引起根系活力的显著降低,使幼苗对养分的吸收利用减慢,生长停滞,降低生物量累积。本研究结果显示,低温胁迫降低了烤烟幼苗根系活力,进而导致植物对水分及营养物质的吸收能力下降,影响植株的正常生长发育。而ABA处理在一

定程度上提高了烤烟幼苗的根系活力,进而促进植株正常生长,即喷施ABA处理烟苗地上部、根部干重及整株生物量均显著高于CK₂处理,说明ABA能缓解低温对烤烟幼苗生长的抑制作用。

4 结 论

低温胁迫严重影响烟苗的生长发育,而喷施ABA处理能缓解低温伤害。喷施ABA可显著提高抗氧化酶活性(SOD、CAT、POD),进而提高烤烟幼苗的抗氧化能力,同时缓解细胞膜的损伤,并增加渗透调节物质可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸的含量,进而提高渗透调节作用;减缓叶绿素的降解速度以降低低温对叶片光合作用的影响;同时维持较高的根系活力水平进而促进烤烟幼苗的正常生长发育,提高烤烟幼苗的抗寒能力。因此,对于烤烟冬季育苗正处低温季节及早春栽培遇倒春寒的情况,可以通过喷施一定浓度的ABA来减轻低温对烤烟幼苗的伤害,这对于烤烟栽培具有重要的指导作用。

参考文献:

- [1] 韩锦峰.烟草栽培生理[M].北京:中国农业出版社,1996:5-8.
- [2] 宋正熊,朱列书,尹佳,等.低温胁迫对烟草幼苗生化指标的影响及相关性分析[J].江西农业学报,2014(2):99-101.
- [3] 韩锦峰,岳彩鹏,刘华山,等.烤烟生长发育的低温诱导研究 I、苗期低温诱导对烤烟顶芽发育及激素含量的影响[J].中国烟草学报,2002,8(1):25-29.
- [4] 郝格格,孙忠富,张录强,等.脱落酸在植物逆境胁迫研究中的进展[J].中国农学通报,2009,25(18):212-215.
- [5] Park M R, Yun K Y, Mohanty B, et al. Supra-optimal expression of the cold-regulated OsMyb4 transcription factor in transgenic rice changes the complexity of transcriptional network with major effects on stress tolerance and panicle development [J]. Plant Cell Environ, 2010, 33: 2209-2230.
- [6] 陆敏,陆贵清.脱落酸与植物非生物逆境抗性研究进展[J].北方园艺,2014(8):184-188.
- [7] 刘红娟,刘洋,刘琳.脱落酸对植物抗逆性影响的研究进展[J].生物技术通报,2008(6):7-9.
- [8] 莫小锋,贡柳玲,邱莉维,等.外源ABA处理提高结缕草抗寒性试验[J].南方园艺,2014,25(3):6-10.
- [9] 黄杏,陈明辉,杨丽涛,等.低温胁迫下外源ABA对甘蔗幼苗抗寒性及内源激素的影响[J].华中农业大学学报,2013(4):6-11.
- [10] 刘艳菊,林以运,曹红星,等.外源ABA对低温胁迫油棕幼苗生理的影响[J].南方农业学报,2016,47(7):1171-1175.
- [11] 黄宇,王倩,毕畅,等.外源ABA对低温下雷公藤幼苗的生理响应[J].福建林学院学报,2011,31(3):198-202.
- [12] 张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2003:65-88.
- [13] Su C F, Wang Y C, Hsieh T H, et al. A novel MYBS3-dependent pathway confers cold tolerance in rice[J]. Plant Physiology, 2010, 153: 145-158.
- [14] 石永春,杨永银,范邓鹏,等.叶面喷施海藻酸和KH₂PO₄对缓解烟草低温胁迫的生理分析[J].河南农业大学学报,2013,47(6):667-670.
- [15] 李琦瑶,王树声,周培禄,等.低温胁迫对烟苗叶形及生理特性的影响[J].中国烟草科学,2018,39(1):17-23.
- [16] 许英,陈建华,朱爱国,等.低温胁迫下植物响应机理的研究进展[J].中国麻业科学,2015(1):40-49.
- [17] 黄杏.外源ABA提高甘蔗抗寒性的生理及分子机制研究[D].南宁:广西大学,2012.
- [18] 李冬花.外源ABA和SA对低温胁迫下圆柏属植物幼苗生理特性的影响[D].兰州:兰州交通大学,2014.
- [19] 任军,黄志霖,曾立雄,等.低温胁迫下植物生理反应机理研究进展[J].世界林业研究,2013,26(6):15-20.
- [20] 章锦涛,王华,王松,等.外施脱落酸对低温胁迫下山茶花生理生化指标的影响[J].安徽农业大学学报,2017,44(1):142-145.
- [21] 刘俊美,单长卷.硒对镉胁迫下玉米幼苗生理特性的影响[J].东北农业科学,2020,45(3):1-5.
- [22] 姜籽竹,朱恒光,张倩,等.低温胁迫下植物光合作用的研究进展[J].作物杂志,2015(3):23-28.
- [23] 崔翠,王利鹏,周清元,等.低温胁迫下烤烟幼苗叶片光合作用和抗氧化能力基因差异表达谱[J].生态学报,2014,34(21):6076-6089.
- [24] 包卓.低温高光锻炼下烤烟幼苗叶片光合适应性的初步研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [25] 周娜娜,武耀廷,高华援,等.铜胁迫对花生幼苗生长及生理代谢的影响[J].东北农业科学,2019,44(6):6-9.
- [26] 赵娟,王芳,李永生,等.钙对低温胁迫下玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J].甘肃农业大学学报,2016,51(6):30-35.
- [27] 李晶,张丽芳,焦健,等.低温胁迫下外源ABA对玉米幼苗生长影响[J].东北农业大学学报,2015(11):1-7.

(责任编辑:刘洪霞)