

杨文飞, 杜永林, 顾大路, 等. 4 种调节物质对水稻耐低温能力的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(4): 739-746.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.04.003

4 种调节物质对水稻耐低温能力的影响

杨文飞¹, 杜永林², 顾大路¹, 贾艳艳¹, 王伟中¹, 吴传万¹, 杜小凤¹, 文廷刚¹, 彭杰¹

(1. 江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏 淮安 223001; 2. 江苏省农业委员会, 江苏 南京 210036)

摘要: 为了筛选提高水稻后期耐低温能力的调节物质, 以淮稻 5 号为试验材料, 在低温胁迫条件下研究壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇等物质对水稻耐低温能力的影响。试验结果表明: 低温胁迫使水稻倒二叶的叶绿素含量和 *SOD*、*POD* 酶活性下降, 脯氨酸、MDA 含量增加, 且随着低温胁迫时间的延长, 水稻倒二叶中活性物质含量或活性受影响程度越大; 喷施壳聚糖、水杨酸、脱落酸和聚乙二醇均能提高低温胁迫下水稻倒二叶中叶绿素含量和 *SOD*、*POD* 酶活性, 降低脯氨酸、MDA 含量, 提高水稻结实率和千粒质量, 且随着低温胁迫时间的延长, 水杨酸、聚乙二醇处理提高水稻倒二叶中酶活性和水稻结实率、千粒质量的效果更好。说明, 在低温胁迫下可以通过提前喷施水杨酸、聚乙二醇等调节物质来增加水稻体内耐低温能力的活性物质的含量或活性, 提高水稻的耐低温能力, 减轻低温胁迫对水稻叶片的伤害, 降低低温胁迫对水稻产量的影响。

关键词: 水稻; 孕穗期; 调节物质; 低温胁迫; 耐低温能力

中图分类号: S511.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)04-0739-08

Effects of four kinds of regulatory agents on cold-tolerance of rice

YANG Wen-fei¹, DU Yong-lin², GU Da-lu¹, JIA Yan-yan¹, WANG Wei-zhong¹, WU Chuan-wan¹, DU Xiao-feng¹, WEN Ting-gang¹, PENG Jie¹

(1. Institute of Agricultural Sciences of Huaiyin in Xuhuai District of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China; 2. Jiangsu Provincial Commission of Agriculture, Nanjing 210036, China)

Abstract: Rice variety Huaidao 5 was adopted to investigate the effects of regulatory agents chitosan, salicylic acid, abscisic acid and polyethylene glycol on low temperature tolerance in cold-stressed rice. Cold stress decreased the content of chlorophyll, *SOD* and *POD* activities, and increased the proline and MDA content in the second leaf from the top of rice. The prolongation of cold stress resulted in greater negative effect on the content of active substances in the second leaf from the top of rice. The applications of chitosan, salicylic acid, abscisic acid or polyethylene glycol could increase the content of chlorophyll, *SOD* and *POD* activities, decreased the contents of MDA and proline in the second leaf from the top of rice,

and improved the seed setting rate and 1 000-grain weight. The salicylic acid and polyethylene glycol showed better effects on the improvement of enzymes activities in the second leaf from the top of rice, suggestive of higher contents of cold-tolerant active substances and smaller damage to rice leaves and yields caused by low temperature in salicylic acid and polyethylene glycol applied rice.

Key words: rice; booting stage; regulating material; low-temperature; chill-resistance

收稿日期: 2017-01-23

基金项目: 江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2015331); 江苏省“六大人才高峰”项目(2015-NY-045); 淮安市重点研发计划(现代农业)项目(HAN201614); 江苏省农业三新工程项目[SXGC(2015)164]

作者简介: 杨文飞(1975-), 男, 江苏淮安人, 副研究员, 硕士, 从事植物生长调节剂的研发与推广工作。(Tel) 0517-83660771; (E-mail) 13952383328@139.com

通讯作者: 顾大路, (Tel) 0517-83660771; (E-mail) gudalu666@aliyun.com

水稻是中国最主要的粮食作物之一,在国民经济中占有非常重要的地位,其播种面积、总产量和单产均居粮食作物首位。近年来,随着在水稻生产过程中低温寡照、连续阴雨等逆境气候的频繁发生,对中国的水稻生产带来了巨大损失。资料显示,中国所有稻区都有冷害发生,一般每4~5年就发生1次较大规模的低温冷害,中国灾年损失稻谷 $5\times 10^9\sim 1\times 10^{10}$ kg^[1]。水稻幼苗期和孕穗期对低温最敏感,水稻孕穗至抽穗扬花是低温影响产量的关键时期。2014年8~9月,江苏省持续降水低温,严重影响水稻抽穗、灌浆,对水稻产量影响极大。研究结果表明,一些调节物质可以提高水稻的耐低温能力。但是利用调节物质提高水稻耐低温能力的研究多集中在幼苗期,而对调节物质提高孕穗期水稻耐低温能力的研究较少。本试验以淮安市水稻主推品种淮稻5号为试验材料,在孕穗期通过人工模拟低温胁迫,研究4种调节物质对水稻耐低温能力的影响,以期筛选出提高水稻耐低温能力效果理想的调节物质,为水稻生产上预防和减轻水稻后期低温对水稻的危害提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为淮稻5号。供试调节物质为水杨酸(SA,99%,上海市蓓琅生物科技有限公司生产)、脱落酸(ABA,98%,四川科瑞森生物工程有限公司生产)、壳聚糖(分子量2000,脱乙酰度95%,山东省潍坊市东兴甲壳制品厂生产)、聚乙二醇(PEG6000,99%,广东光华科技股份有限公司生产)。

1.2 试验设计

试验设6个处理。其中低温胁迫条件下5个处理,分别为:5 g/kg壳聚糖溶液、50 mg/kg水杨酸溶液、20 mg/kg脱落酸溶液、250 g/kg聚乙二醇(PEG6000)溶液、低温清水对照(CK1,喷等量清水);自然条件下1个处理,即喷清水后的水稻在自然条件下生长,作为空白对照(CK2)。4种调节物质的处理浓度为其在农业生产上推荐使用的浓度。

1.3 试验处理

试验于2015年在江苏省淮安市农业科学院城南试验田进行。前茬为小麦,土壤为壤土,土壤养分情况:有机质含量为20.600 g/kg,含氮量为0.132

g/kg,碱解氮为72.510 mg/kg,速效磷为9.500 mg/kg,速效钾为217.000 mg/kg,pH值为8.2,肥力中等。5月18日播种育苗,6月22日机插移栽,株行距为30 cm×13 cm。田间管理按常规的水稻高产栽培技术进行。

田间水稻生长进入分蘖期时,选取发育进程与长势基本一致的单株栽插的稻株带泥(保持根系完整)移入盆钵(内径20 cm,高17 cm)进行培育,每盆移栽1穴,每个处理3盆。各调节物质配好试验浓度于水稻孕穗期(8月20日)进行叶面喷施,清水对照喷等量清水。处理后1 d把需要低温胁迫处理的水稻移入HP1500GS-B型全智能人工气候箱进行低温处理,温度设定为20℃/15℃(昼/夜平均温度),相对湿度75%,白天光照12 h,光照度10 000 lx,处理2 d和5 d,期间盆钵中不断加水保持土壤水分与大田一致。自然条件下生长的水稻喷清水,不进行低温胁迫处理。

1.4 测定指标

在低温处理2 d和5 d后移出人工气候箱,剪取5个处理的水稻倒二叶测定叶绿素含量、脯氨酸含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性及丙二醛(MDA)含量;同时以自然条件下正常生长的水稻作为空白对照(CK2),剪取水稻倒二叶进行指标测定,其中脯氨酸含量采用茚三酮显色法^[2],叶绿素含量采用分光光度法测定^[3]、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性及丙二醛(MDA)含量测定参照李合生^[4]的方法进行。

收获时,对不同处理的剪取倒二叶的稻株单收进行考种,主要考察穗总粒数、穗实粒数、千粒质量。

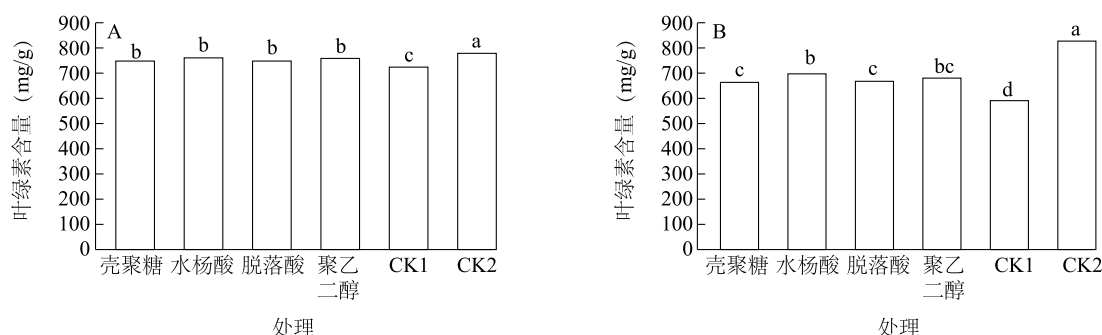
2 结果与分析

2.1 不同调节物质对低温胁迫下水稻叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的物质,是反映植物生长状况的一个指标,其在功能叶中的含量高低通常表示植物所处逆境胁迫的强弱^[5]。从图1可以看出,在均未喷施调节物质的情况下,低温胁迫的水稻倒二叶中叶绿素含量明显低于自然状态下生长的水稻倒二叶中叶绿素含量,差异显著;且低温胁迫时间越长,水稻倒二叶中叶绿素含量越低。说明,低温胁迫可造成叶片中叶绿素含量

下降,这与马德华等^[6]研究结论一致。在低温胁迫2 d、5 d的条件下,喷施壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇溶液的水稻倒二叶中叶绿素含量高于喷清水的水稻倒二叶中叶绿素含量,但是比自然状态下生长的水稻倒二叶中叶绿素含量低。经方差分析发现,低温胁迫2 d时,4种调节物质之间虽有差异,但未达显著水平;低温胁迫5 d时,4

种调节物质之间差异达显著水平,其中喷施水杨酸的水稻倒二叶中叶绿素高于喷施壳聚糖、脱落酸的水稻倒二叶中叶绿素含量,喷施水杨酸和喷施聚乙二醇之间差异不显著。说明,喷施壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇可以提高低温胁迫下水稻叶片中的叶绿素含量。



A:低温胁迫2 d;B:低温胁迫5 d。CK1:低温清水对照,低温胁迫条件下喷等量清水;CK2:空白对照,即喷清水后水稻植株在自然条件下生长。不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图1 不同调节物质对低温胁迫下水稻倒二叶中叶绿素含量的影响

Fig.1 Effects of regulatory agents on chlorophyll content of rice second leaf from top under low-temperature stress

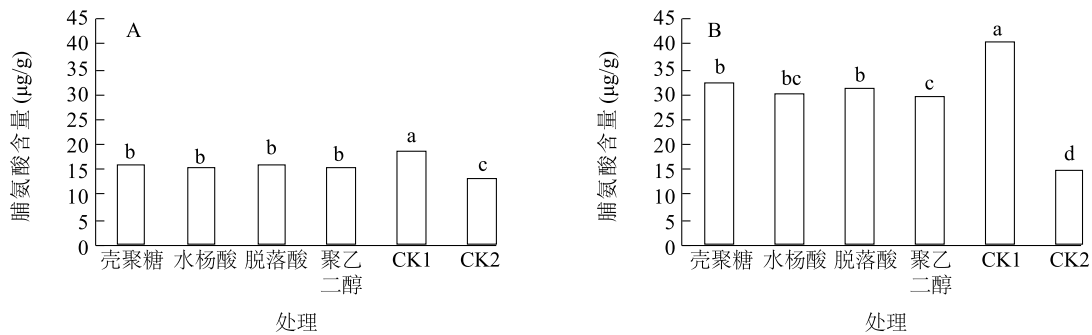
2.2 不同调节物质对低温胁迫下水稻叶片中脯氨酸含量的影响

脯氨酸作为渗透调节物质,具有维持细胞正常的酸碱度和稳定生物膜的作用。脯氨酸在植物受到低温等伤害时会大量积累,积累的脯氨酸可以作为植物细胞质内渗透调节物质,防止细胞脱水^[7]。从图2可以看出,在均未用调节物质处理的情况下,低温胁迫可以使水稻叶片中的脯氨酸含量增加,且随着低温胁迫时间的延长脯氨酸含量增加,差异达显著水平。在低温胁迫2 d时,用壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇等物质处理的水稻倒二叶中脯氨酸含量高于自然状态下生长的水稻倒二叶中脯氨酸含量,低于低温胁迫下水稻倒二叶中脯氨酸含量,差异达显著水平,但不同调节物质之间差异不显著;在低温胁迫5 d时,聚乙二醇处理降低脯氨酸含量的效果高于壳聚糖、脱落酸处理,达显著水平,水杨酸、脱落酸处理间的差异未达显著水平。说明,壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇等物质可以降低低温胁迫下水稻叶片中脯氨酸的含量,增强细胞稳定性,减轻低温胁迫所引起的水稻体内渗透物质的积累,减少低

温对水稻的伤害,即壳聚糖、水杨酸、脱落酸和聚乙二醇等物质都有提高水稻耐寒性的作用,可以减轻低温胁迫对水稻的伤害。相比较而言,聚乙二醇提高水稻耐寒性的效果要好一些。

2.3 不同调节物质对低温胁迫下水稻叶片中活性酶的影响

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)酶活性大小可以作为衡量植物耐冷性大小的指标。细胞内通过多种途径产生 H_2O_2 、 O_2 等活性氧自由基,活性氧自由基增多就会伤害植物细胞,如引发降解反应、膜脂过氧化、细胞膜变性等。植物细胞内存在的活性氧清除剂能有效清除活性氧,使其维持在较低的水平,从而避免或减轻膜伤害^[8]。超氧化物歧化酶(SOD)作为超氧自由基清除剂,在适度逆境条件下其活性有所提高,以增强植物的抗逆能力。过氧化物酶(POD)作为细胞内清除活性氧系统中的重要酶,能催化 H_2O_2 与酚类的反应,起到清除过氧化物的作用。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)属于清除超氧自由基和活性氧的保护系统^[9-10]。



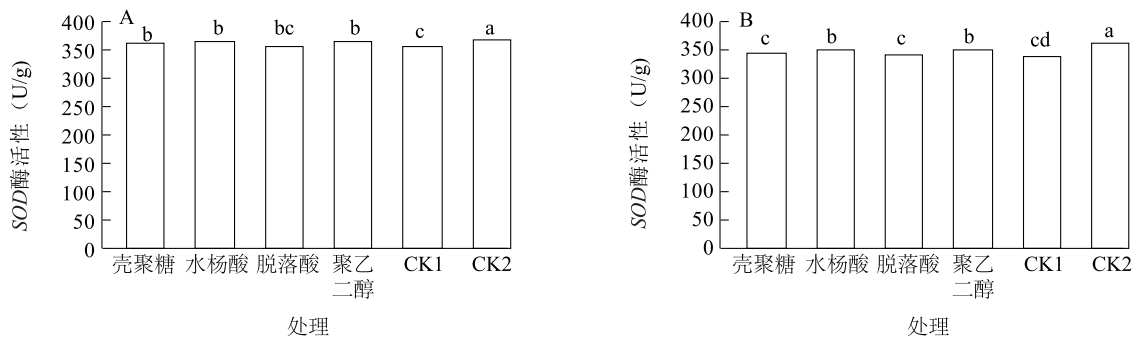
A: 低温胁迫 2 d; B: 低温胁迫 5 d。CK1、CK2 见图 1 注; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同物质对低温胁迫下水稻倒二叶片中脯氨酸含量的影响

Fig.2 Effects of regulatory agents on proline content of rice second leaf from top under low-temperature stress

从图 3 可以看出, 低温胁迫可以降低水稻叶片中 *SOD* 的活性, 且随着低温胁迫时间的延长, 其活性降低。用壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇处理的水稻可以提高低温胁迫下水稻叶片中 *SOD* 的活性, 但是比自然状态下生长的水稻叶片中 *SOD* 活性低, 差异显著。在低温胁迫 2 d 时, 几种调节物质处理间水稻叶片中 *SOD* 活性差异不显著, 说明在低温胁迫时间短的情况下, 壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙

二醇都有增加水稻叶片中 *SOD* 活性的效果, 都有提高水稻耐寒性的作用。在低温胁迫 5 d 时, 几种调节物质处理间差异显著, 水杨酸、聚乙二醇增加水稻叶片中 *SOD* 活性效果高于壳聚糖、脱落酸, 差异显著, 水杨酸、聚乙二醇处理间无显著差异。说明, 在低温胁迫时间较长情况下, 水杨酸、聚乙二醇提高水稻耐寒性的效果最好。



A: 低温胁迫 2 d; B: 低温胁迫 5 d。CK1、CK2 见图 1 注; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同调节物质对低温胁迫下水稻倒二叶片中 *SOD* 酶活性的影响

Fig.3 Effects of regulatory agents on *SOD* activity of rice second leaf from top under low-temperature stress

从图 4 可以看出, 低温胁迫可以降低水稻叶片中 *POD* 的含量, 且随着低温胁迫时间的延长, 其含量降低。用壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇等物质处理的水稻可以提高低温胁迫下的水稻叶片中 *POD* 的含量, 但是比自然状态下生长的水稻叶片中含量低, 差异达显著水平。在低温胁迫 2 d 时, 几种调节物质处理间差异不显著; 在低温胁迫 5 d 时, 几种调节物质处理间差异显著, 水杨酸、聚乙二醇处理增加水稻叶片中 *POD* 含量效果高于壳聚糖、脱落

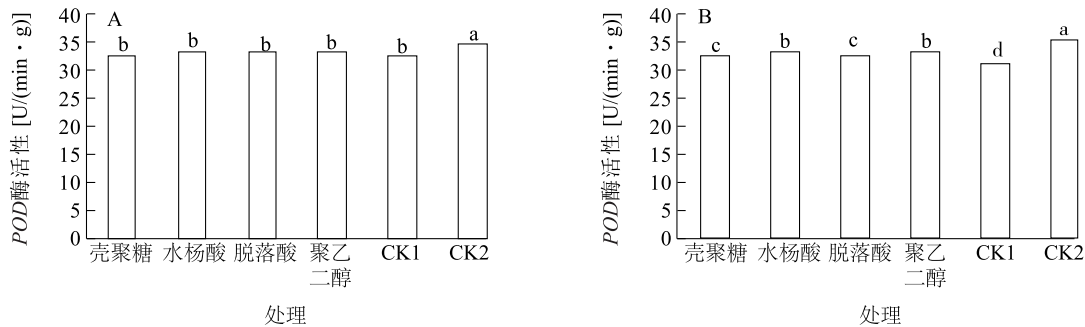
酸, 水杨酸处理与聚乙二醇处理差异不显著, 说明, 在低温胁迫时间较长情况下, 水杨酸、聚乙二醇提高水稻耐寒性效果最好。

2.4 不同调节物质对低温胁迫下水稻叶片中丙二醛(MDA)含量的影响

丙二醛(MDA)是膜脂氧化的主要产物之一, 其在组织中积累是细胞膜受伤害的重要指标, 同时由于其可使纤维素分子间桥键松弛, 或抑制蛋白质的合成, 而对细胞膜产生进一步的伤害。因此, 逆境

胁迫下丙二醛含量的变化是植物受伤害程度的又一重要指标^[7]。从图5可以看出,低温胁迫可以使水稻倒二叶中的丙二醛含量增加,且随着低温胁迫时间的延长,丙二醛的含量也增加,差异达显著水平。在低温胁迫2 d时,不同调节物质处理间差异不显著;在低温胁迫5 d时,不同调节物质处理间差异达显著水平,水杨酸、聚乙二醇处理提高水稻耐寒性效

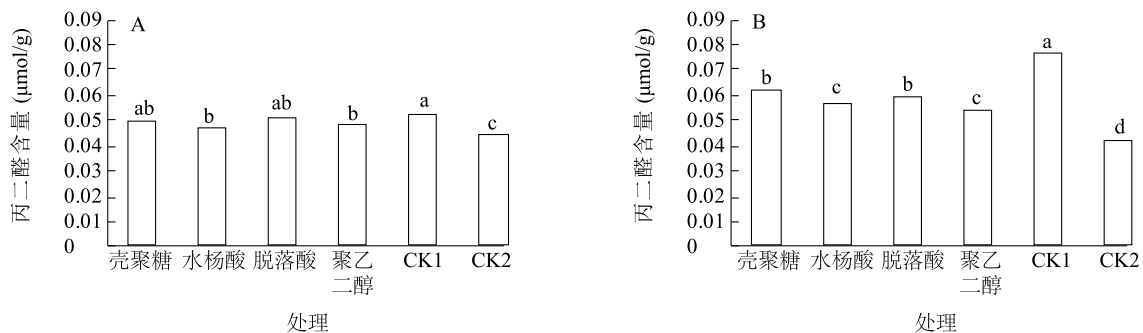
果高于壳聚糖和脱落酸处理,水杨酸和聚乙二醇处理间无显著差异。说明,壳聚糖、水杨酸、脱落酸和聚乙二醇可以提高水稻的耐寒性,减少低温胁迫对水稻体内细胞的破坏,降低低温胁迫下水稻叶片中丙二醛含量。在低温胁迫时间较长情况下,应用水杨酸和聚乙二醇提高水稻耐寒性的效果更理想。



A:低温胁迫2 d;B:低温胁迫5 d。CK1、CK2见图1注;不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图4 不同调节物质对低温胁迫下水稻倒二叶片中POD活性的影响

Fig.4 Effects of regulatory agents on POD activity of rice second leaf from top under low-temperature stress



A:低温胁迫2 d;B:低温胁迫5 d。CK1、CK2见图1注;不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

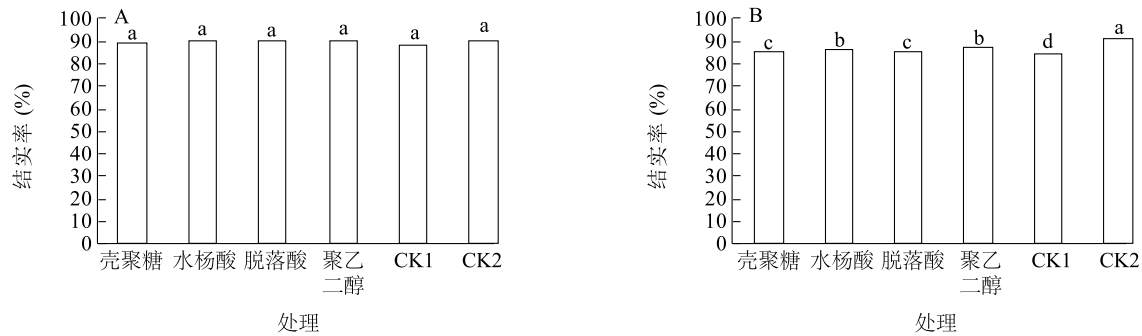
图5 不同调节物质对低温胁迫下水稻倒二叶片中丙二醛含量的影响

Fig.5 Effects of regulatory agents on malondialdehyde content of rice second leaf from top under low-temperature stress

2.5 不同调节物质对低温胁迫下水稻产量性状的影响

穗粒数和千粒质量是水稻产量的重要构成要素,水稻孕穗期至灌浆期的生长中心为稻穗,过高或过低的温度均会对稻穗造成比功能叶片更严重的伤害,从而影响水稻产量。从图6、图7可以看出,低温胁迫可以降低水稻的结实率和千粒质量,且随着低温胁迫时间的延长,结实率和千粒质量下降幅度越大,与李健陵等^[11]、曾宪国等^[12]的研究结果相同。从图6可以看出,低温胁迫2 d时对水稻结实率的影响不显著;低温胁迫5 d对水稻结实率有明

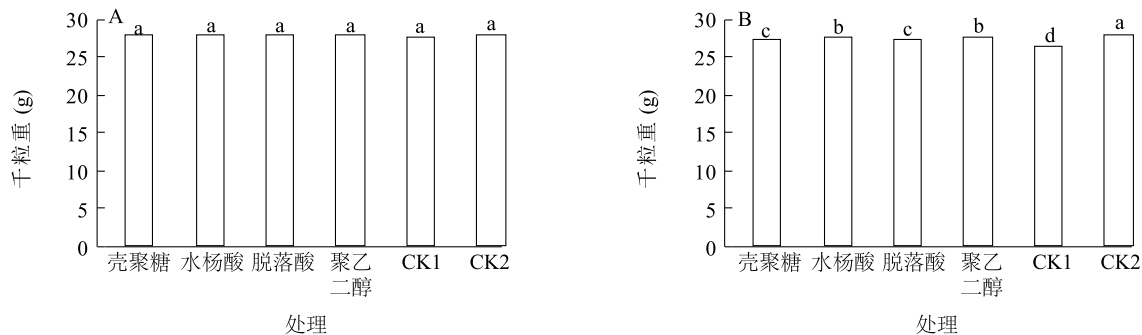
显影响,差异达显著水平。低温胁迫5 d,壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇处理均能提高水稻的结实率,不同调节物质处理间差异显著,水杨酸和聚乙二醇处理提高水稻结实率的效果更显著,二者之间无显著差异。从图7可以看出,低温胁迫2 d对水稻千粒质量的影响不显著;低温胁迫5 d对水稻千粒质量有明显影响,差异显著。低温胁迫5 d,壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇处理均能提高水稻的千粒质量,不同调节物质处理间差异达显著水平,水杨酸和聚乙二醇提高水稻千粒质量的效果更显著,水杨酸和聚乙二醇处理间无显著差异。



A: 低温胁迫 2 d; B: 低温胁迫 5 d。CK1、CK2 见图 1 注; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 不同调节物质对低温胁迫下水稻结实率的影响

Fig.6 Effects of regulatory agents on rice seed setting rate under low-temperature stress



A: 低温胁迫 2 d; B: 低温胁迫 5 d。CK1、CK2 见图 1 注; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 7 不同调节物质对低温胁迫下水稻千粒质量的影响

Fig.7 Effects of regulatory agents on 1 000-grain weight of rice under low-temperature stress

3 讨论

3.1 调节物质对低温胁迫下水稻叶片中叶绿素含量的影响

光合作用是作物产量的基础,而叶绿素是作物进行光合作用的主要物质,因此作物叶片中叶绿素含量的多少与作物产量高低有一定的相关性。但在水稻生长发育过程中经常会遇到低温现象,低温会使水稻叶片中叶绿素含量下降,且随着低温时间的延长,叶绿素含量逐渐下降,伴随着叶绿素含量的降低,叶片光合作用也随之衰退^[11,13-16]。低温胁迫下叶绿素含量减少的原因很多,Hasselt^[17]认为低温下叶绿素含量的降低不是由于色素合成的障碍,而是由于原有叶绿素受到破坏的结果;Friend^[18]则认为叶绿素含量的下降,可能是由于低温限制了叶绿素的合成而不是引起叶绿素的破坏。而逮明辉等认为:低温下叶片的叶绿素降解加剧,而合成能力降低,导致叶绿素总含量下降^[19]。

在水稻苗期喷施脱落酸、水杨酸、壳聚糖、聚乙二醇等物质可以提高水稻苗期抗寒性^[7-8,20-23],本研究发现,脱落酸、水杨酸、壳聚糖和聚乙二醇在水稻孕穗期应用可以提高低温胁迫下水稻叶片中叶绿素含量,且水杨酸、聚乙二醇提高水稻叶片中叶绿素含量的效果好于壳聚糖、脱落酸。

3.2 调节物质对低温胁迫下水稻叶片中酶活性的影响

低温下植物体内会产生大量的活性氧与自由基^[24],活性氧和自由基的增加会引起膜脂过氧化,使膜脂过氧化产物 MDA 显著上升^[11,25-26]。本试验发现,低温胁迫 2 d、5 d 后,水稻体内 MDA 含量都是增加,且随着低温胁迫时间的延长,其含量呈增加趋势。在低温胁迫下,喷施壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇都能降低水稻叶片中 MDA 的含量,减少低温胁迫对水稻的伤害,与马伟等^[7]、张蕊等^[8]、Friend 等^[18-23]的研究结果一致;低温胁迫时间稍长,水杨酸、聚乙二醇降低水稻叶片中 MDA 含量的效

果好于壳聚糖和脱落酸。说明,壳聚糖、脱落酸、水杨酸和聚乙二醇可以降低低温胁迫下产生过氧化物对水稻的伤害,水杨酸和聚乙二醇提高水稻耐寒性的效果更好。

植物体内抗氧化酶系统与逆境胁迫相关,相关酶类(如 *SOD*、*POD* 等)可相互协同,共同清除植物体内过多的超氧自由基,保护细胞免受自由基的伤害^[27]。有研究结果表明适当低温会造成水稻叶片活性氧自由基的增加,同时水稻叶片内的抗氧化酶也会随之增加,以使自由基维持在适当水平,减少自由基对细胞的伤害^[28]。李健陵等^[11]研究发现孕穗期低温使早稻倒二叶 *SOD*、*POD* 酶活性下降。本试验结果与李健陵等的研究结果相同,水稻在低温胁迫下,水稻叶片中的 *SOD*、*POD* 酶活性下降,且随着低温胁迫时间的延长而呈下降趋势。在低温胁迫 2 d 时,水稻倒二叶片中 *SOD*、*POD* 酶活性下降,但与自然状态下生长的水稻差异不大,低温胁迫 5 d 时水稻叶片中 *SOD*、*POD* 酶活性下降幅度大,与自然状态下水稻叶片中 *SOD*、*POD* 的酶活性有显著差异。本研究发现,喷施壳聚糖、水杨酸、脱落酸和聚乙二醇可以提高低温胁迫下水稻叶片中 *SOD*、*POD* 的酶活性,且以喷施水杨酸、聚乙二醇效果最好。说明,壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇等调节物质可以提高低温胁迫下水稻叶片中 *SOD*、*POD* 的活性,提高水稻的耐寒性。

3.3 调节物质对低温胁迫下水稻叶片中脯氨酸含量的影响

植物的渗透调节物质主要包括脯氨酸和可溶性糖,脯氨酸是一种重要的调节物质,其抗寒作用是调节和维持结冰前溶冰后原生质与环境的渗透平衡,防止由于原生质体水分散失而造成的原生质发生不可逆转的凝胶化,促进蛋白质与水的结合,增加蛋白质的可溶性^[29-33]。因此,许多研究将脯氨酸含量作为抗寒性的指标^[31-34]。宗会等^[35]、路运才等^[36]认为,低温胁迫增加了水稻苗体内脯氨酸的含量。本研究发现,低温胁迫可以增加水稻叶片中脯氨酸含量,且随着低温胁迫时间的延长其含量呈增加趋势。但是在喷施壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇等物质后,低温胁迫下的水稻叶片中脯氨酸含量下降。

3.4 调节物质对低温胁迫下水稻产量性状的影响

低温不仅对孕穗期水稻功能叶的光合作用产生抑制,而且影响水稻生殖器官的功能。有研究者发

现,孕穗期低温会造成水稻空壳率增加、结实率下降^[37-39],也会造成水稻千粒质量下降^[40-41]。本试验结果表明,孕穗期低温对水稻的结实率和千粒质量均有影响,与李健陵等的研究结果相同^[11]。说明,在水稻孕穗期,低温胁迫对水稻的结实率和千粒质量均有影响,是造成水稻减产的主要因素。本试验研究发现,在水稻孕穗期喷施壳聚糖、水杨酸、脱落酸、聚乙二醇,特别是水杨酸、聚乙二醇可以减轻低温胁迫对水稻产量的影响,挽回低温胁迫对水稻造成的部分产量损失,在低温来临之前喷施壳聚糖、水杨酸、脱落酸和聚乙二醇,特别是水杨酸、聚乙二醇,可以减轻低温胁迫造成的水稻减产的危害。

参考文献:

- [1] 刘建丰,陈立云.水稻耐冷性研究现状与进展[J].作物研究,1996,10(2):41-43.
- [2] 李海波,侯守贵,于广星,等.孕穗抽穗期低温对水稻植株、产量性状及脯氨酸含量的影响[J].中国农学通报,2011,27(1):63-68.
- [3] 杨敏文.快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨[J].光谱实验室,2002,19(4):478-480.
- [4] 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,2006.
- [5] 杜红居.木屑对盐碱土中玉米幼苗生理生化指标的影响[J].安徽农业科学,2014,42(12):3550-3551,3554.
- [6] 马德华,庞金安.黄瓜耐低温研究进展[J].天津农业科学,1997(4):1-7.
- [7] 马伟,霍志国,姬静华,等.壳聚糖和水杨酸混配液对移栽返青期水稻幼苗抗寒性影响及机理[J].中国稻米,2015,21(4):150-154.
- [8] 张蕊,吕俊,米青山,等.低温下外源水杨酸对水稻幼苗抗氧化酶系的影响[J].西南农业大学学报,2006,28(1):29-32,36.
- [9] 陈善娜,梁斌.云南高原水稻抗冷性与其活性氧清除系统的关系[J].云南植物研究,1995,17(4):452-458.
- [10] 刘鸿先,王以柔.低温对植物的细胞膜系统伤害机理的研究[C]//中国科学院华南植物研究所.中国科学院华南植物研究所集刊(第5集).北京:科学出版社,1989:31-38.
- [11] 李健陵,霍治国,吴丽姬,等.孕穗期低温对水稻产量的影响及其生理机制[J].中国水稻科学,2014,28(3):277-288.
- [12] 曾宪国,项洪涛,王立志,等.孕穗期不同低温对水稻空壳率的影响[J].黑龙江农业科学,2014(6):19-21.
- [13] 曾乃燕,何军贤,赵文,等.低温胁迫期间水稻光合膜色素与蛋白水平的变化[J].西北植物学报,2000,20(1):8-14.
- [14] 曹树青,陆巍,翟虎渠,等.用水稻苗期叶绿素含量相对稳定期估算水稻剑叶光合功能期的方法研究[J].中国水稻科学,2001,15(4):309-313.

- [15] 王 静,张成军,陈国祥,等.低温对灌浆期水稻剑叶光合色素和类囊体膜脂脂肪酸的影响[J].中国水稻科学,2006,20(2):177-182.
- [16] 孙 磊,陈国祥,吕川根,等.壳聚糖对低温下水稻剑叶光合特性的影响[J].南京师大学报,2010,33(4):75-79.
- [17] HASSELT P R V. Photoinhibition at low temperature in chilling-sensitive and resistant plants[J]. Acta Bot Neerl, 1972, 21: 539-548.
- [18] FRIEND D J C. The control by state transition of the distribution of excitation energy in photosynthesis[J]. Physiol Plant, 1960, 13: 776-785.
- [19] 逮明辉,姜群峰,陈尽枫.黄瓜的冷害及耐冷性[J].植物学通报,2004,21(5):575-586.
- [20] 吴 楚,王政权.脱落酸及其类似物与植物抗寒性之间的关系[J].植物生理学通讯,2000,36(6):562-567.
- [21] 詹嘉红,兰宗辉.外源 ABA 对低温胁迫水稻过氧化物酶同工酶的影响[J].生物技术,2003,13(1):78-80.
- [22] 曾韶西,王以柔,李美茹,等.冷锻炼和 ABA 诱导水稻幼苗提高水稻抗冷性期间膜保护系统的变化[J].热带亚热带植物学报,1994,2(1):44-50.
- [23] 陈秉初,吴美仙. PEG 预处理对早稻种子活力和抗寒能力的影响[J].植物生理学通讯,1992,28(3):198-201.
- [24] 王国莉,郭振飞.水稻耐冷机理的研究进展[J].惠州学院学报(自然科学版),2004,24(3):8-12.
- [25] 王 静,陈国祥,张成军,等.宁麦 9 号功能叶衰老过程中光合膜特性的变化[J].作物杂志,2005(1):21-24.
- [26] 杨 悦,张兴梅,孙 壮,等.转 *ICE1* 基因水稻耐冷性与膜脂过氧化和抗氧化酶活性的关系[J].江苏农业科学,2015,43(8):71-74.
- [27] CANSEV A, KESICIM. Changes in antioxidant enzyme activities during cold-acclimation in sweet cherry cultivars grafted on different rootstocks[J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2013, 11(1):522-527.
- [28] DHINDSA R S, PLU B—DHINDSA P, THORPE T A. Leaf senescence correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase[J]. Journal of Experimental Botany, 1982, 32(126):91-101.
- [29] 潘瑞炽,董恩得.植物生理学[M].3版.北京:高等教育出版社,2000:218-328.
- [30] 何若韫.植物低温逆境生理[M].北京:中国农业出版社,1995.
- [31] 王荣富.植物抗寒指标的种类及应用[J].植物生理学通讯,1987,23(3):49-55.
- [32] 吴 楚.膜脂变化与植物抗寒性及 H₂O₂ 相形成的关系[J].湖北农学院学报,2000,20(1):84-89.
- [33] 张圣平,顾兴芳,王 烨,等.低温胁迫对以野生黄瓜(棘瓜)为砧木的黄瓜嫁接苗生理生化指标的影响[J].西北植物学报,2005,25(7):1428-1432.
- [34] CHU T M, JUSAITIS M, ASPINAH D. Accumulation of free proline at low temperature[J]. Physiologia Plantarum, 1978, 43: 254-260.
- [35] 宗 会,徐照丽,刘娥娥,等.低温胁迫下氯丙嗪和氯化钡对水稻幼苗脯氨酸积累的影响[J].热带亚热带植物学报,2003,11(3):241-244.
- [36] 路运才,王 森,杜景红,等.外源硅对低温胁迫下水稻幼苗生长的影响及其生理机制[J].安徽农学通报,2014,20(22):42-43,58.
- [37] 曾宪国,项洪涛,王立志,等.孕穗期不同低温对水稻空壳率的影响[J].黑龙江农业科学,2014(6):19-21.
- [38] 姜丽霞,季生太,李 帅,等.黑龙江水稻空壳率与孕穗期低温的关系[J].应用生态学报,2010,21(7):1725-1730.
- [39] 王连敏,王立志,王春艳,等.花期低温对寒地水稻颖花结实的影响[J].自然灾害学报,2004,13(2):92-95.
- [40] 耿立清,王嘉宇,陈温福.孕穗期-灌浆期低温对水稻粒重的影响[J].沈阳农业大学学报,2009,40(2):131-134.
- [41] 高健强,余显权,赵福胜,等.杂交水稻孕穗期和开花期耐冷性鉴定指标研究[J].贵州农业科学,2006,34(5):21-23.

(责任编辑:陈海霞)