

顾大路, 杨文飞, 文廷刚, 等. 冻害胁迫下防冻剂处理对小麦生理特征和产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(3): 490-496.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.03.002

## 冻害胁迫下防冻剂处理对小麦生理特征和产量的影响

顾大路, 杨文飞, 文廷刚, 杜小凤, 王伟中, 吴传万

(江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏 淮安 223001)

**摘要:** 以矮抗 58 和淮麦 30 为试验材料, 研究了冻害胁迫下防冻剂对不同抗寒性小麦品种生理特征和产量及其构成因素的影响。冻害胁迫下, 防冻剂处理显著提高了矮抗 58 和淮麦 30 叶绿素和游离脯氨酸含量, 增加了 *SOD* 活性, 降低了 MDA 含量, 增强了根系活力, 提高了两品种的抗寒能力。防冻剂对淮麦 30 抗寒性的提高效果更明显。相关性分析结果表明, 小麦各生理指标的变化联系紧密, 叶绿素含量、脯氨酸含量、*SOD* 活性以及根系活力与植株抗寒能力密切相关。同时, 矮抗 58 和淮麦 30 的成穗数、千粒质量和地上部分生物量均较对照显著增加, 进而提高了小麦的产量和收获指数。相关分析表明, 小麦产量与成穗数和穗粒数显著正相关。因此, 在冻害胁迫下, 喷施防冻剂来提高小麦抗寒性并保持小麦成穗数和穗粒数的稳定对小麦的稳产增产意义重大。

**关键词:** 冻害胁迫; 防冻剂; 小麦; 产量; 生理特征

**中图分类号:** S512.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2016)03-0490-07

## Effect of antifreeze on the physiological characteristics and yield of freezing-stressed wheat

GU Da-lu, YANG Wen-fei, WEN Ting-gang, DU Xiao-feng, WANG Wei-zhong, WU Chuan-wan

(Huaiyin Institute of Agricultural Sciences in the Xuhuai Area of Jiangsu, Huai'an 223001, China)

**Abstract:** The influence of antifreeze treatment on the physiological characteristics and yield as well as its components of wheat, Aikang 58 and Huaimai 30, were studied under freezing stress. The antifreeze raised the chlorophyll content and proline content, increased *SOD* activity, decreased MDA content, and enhanced root activity, thereby improving the cold resistances of Aikang 58 and Huaimai 30. The improvement of cold resistance was more significant in Huaimai 30. Correlation analysis revealed that under freezing stress, physiological indices connected closely with each other, the chlorophyll and proline content, *SOD* activity, and root activity showing significantly positive correlations with anti-coldness in wheat. Compared to

收稿日期: 2015-10-10

**基金项目:** 淮安市农科院院长基金项目(HNY201502); 淮安市科技支撑计划(农业)项目(SN13067); 国家小麦产业技术体系项目(CARS-3-2-13); 公益性行业(农业)科研专项项目(201203033-07); 江苏省农业三项工程项目[SXGC(2013)341]

**作者简介:** 顾大路(1972-), 男, 江苏新沂人, 硕士, 副研究员, 主要从事作物栽培技术及植物生长调节剂的研究与应用工作。

(Tel) 0517-83660771; (E-mail) gudalu666@aliyun.com

**通讯作者:** 王伟中, (Tel) 0517-83672908; (E-mail) wwz8390@sina.com

control, the spike number, grain number per spike, 1 000-grain weight and above-ground biomass of Aikang 58 and Huaimai 30 were enhanced significantly by antifreeze, thus increasing the yield and harvest index of wheat. Correlation analysis showed that under freezing stress, the grain yield was significantly positive related to the spike number and grain number per spike. Therefore, antifreeze application under freezing stress which could enhance the cold resistance and maintain the spike number and grain

number per spike of wheat had a great significance in improving the production of wheat.

**Key words:** freezing stress; antifreeze; wheat; yield; physiological characteristic

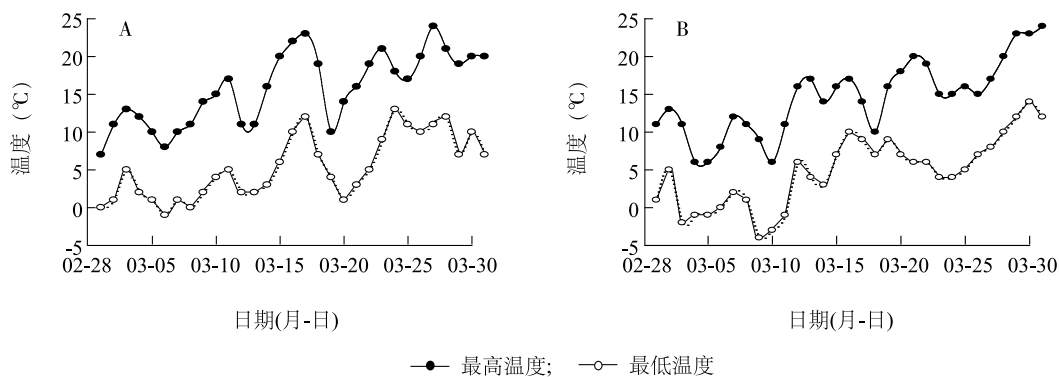
春季低温冻害是中国黄淮麦区和长江中下游麦区小麦生产的主要气象灾害之一,它发生频繁、发生面积大、危害重,严重影响和制约着小麦生产<sup>[1]</sup>。随着全球气候变暖,中国出现冬暖春寒的现象更频繁,从而导致小麦春季冻害不断发生。“倒春寒”是常见的春季低温冻害,多发生于3月中旬至4月中上旬,由于此时小麦幼穗分化到四分体期,其对低温冷冻最为敏感,极易发生冻害。前人研究结果表明小麦受冻害程度不仅与品种、降温强度和低温持续时间长短有关,也与播期、播量、土壤及水肥管理措施等方面有很大关系<sup>[2]</sup>。王永华等<sup>[3]</sup>指出通过选用抗寒耐冻品种、合理安排播期和播量、培育壮苗越冬、适时冬灌防干冻等措施可以预防和减少冻害的发生。蒙钟文等<sup>[4]</sup>研究发现利用外源 NO 处理或 CO<sub>2</sub> 激光处理后,可显著减少低温胁迫下小麦叶片中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和超氧阴离子 (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) 积累,提高 SOD、CAT、POD 等抗衰老酶活性,促进小麦幼苗生长发育。胡丽涛等<sup>[5]</sup>研究结果表明 10 mmol/L 钙处理能提高小麦渗透调节物质含量,有效缓解低温胁迫对小麦造成的膜损伤,并通过 Ca<sup>2+</sup>-CaM 信使系统参与调控小麦光合作用,进而增强小麦的抗寒性。汤新海等<sup>[6]</sup>研究认为施用生长调节剂,如矮苗壮、15% 多效唑可湿性粉剂等可增强麦株抗寒能力。关于如何缓解低温冻害对小麦植株的伤害已有许多报道<sup>[7-10]</sup>,但利用小麦防冻剂来缓解冻害对小麦的伤害以及对小麦

产量及生理特征影响的研究较少。本研究选择抗寒性不同的 2 个小麦品种研究了防冻剂处理后春季低温冻害对不同抗寒性小麦品种的生理特征和产量的影响,以期小麦抗低温逆境生产和冻害后小麦的减灾栽培提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2013–2015 连续两年在淮安市农科院现代农业高新科技园区内进行。前茬为水稻,土壤肥力中等。供试小麦品种为半冬性品种矮抗 58(强抗寒性)和春性品种淮麦 30(弱抗寒性)。试验采用裂区设置,主区为 2 个小麦品种,副区为防冻剂处理和对照,小区面积为 15 m<sup>2</sup> (3 m×5 m),随机分布,3 次重复。小麦拔节期时,在寒潮到来前 24 h 喷施防冻剂,喷药量为 1 500 ml/hm<sup>2</sup>,以喷清水为对照。小麦分别于 2013 年 10 月 20 日和 2014 年 10 月 22 日人工均匀条播,行距 25 cm,基本苗为 1 hm<sup>2</sup> 2.1×10<sup>6</sup> 株。小区播前深翻并施入纯 N 120 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>;拔节期追施纯 N 120 kg/hm<sup>2</sup>,氮肥为尿素。2014 年防冻剂处理时间为 3 月 5 号(低温前 24 h,图 1A),2015 年为 3 月 8 号(低温前 24 h,图 1B)。其他管理同大田高产栽培。



A: 2014 年; B: 2015 年。

图 1 防冻剂处理时的日平均温度

Fig.1 Daily average temperatures during antifreeze application

## 1.2 取样方法与测定项目

小麦处理后,择长势一致,无病虫害危害的单茎进行标记,用于叶绿素含量、脯氨酸含量、SOD 活性、MDA 含量以及根系活力的测定。从处理后 5 d 开始,每隔 5 d 取样并测定相关指标,总共 5 次。成熟期每小区取样进行室内考种和产量考查。

叶绿素含量测定:于处理后 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d 在每小区分别选取 5 个标记单茎,用丙酮提取法<sup>[11]</sup>测定小麦旗叶中部的叶绿素含量。

脯氨酸含量测定:于处理后 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d 在每小区分别选取 5 个标记单茎,采用磺基水杨酸提取比色法测定<sup>[12]</sup>;

SOD 活性测定:分别在小麦处理后 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d,每小区选取标记单茎且大小均匀的旗叶 5 片,用液氮速冻后保存于 $-40^{\circ}\text{C}$ 低温冰箱,采用氮蓝四唑(NBT)法测定<sup>[13]</sup>;

MDA 含量测定:于处理后 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d 在每小区分别选取 5 个标记单茎,采用硫代巴比妥酸法测定<sup>[14]</sup>;

根系活力测定:于处理后 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d 在每小区分别选取 5 个标记单茎,选取根尖部分,采用 TTC 还原法测定<sup>[15]</sup>。

干物质积累测定:于成熟期每小区选取 30 个主茎,按叶片、茎秆、叶鞘分样,立即置于烘箱  $105^{\circ}\text{C}$  下杀青 30 min,之后降至  $80^{\circ}\text{C}$  烘干至恒质量,称其干质量,用于计算各营养器官的干物质积累和分配。

小麦成熟收获前 1 d 每小区选取  $1\text{ m}^2$  样点,从中选取代表性麦穗 20 个,计算平均穗长和穗粒数。每小区收获  $1\text{ m}^2$  的样点 5 个,计算产量和成穗数。测定各样点籽粒千粒质量。

## 1.3 数据分析

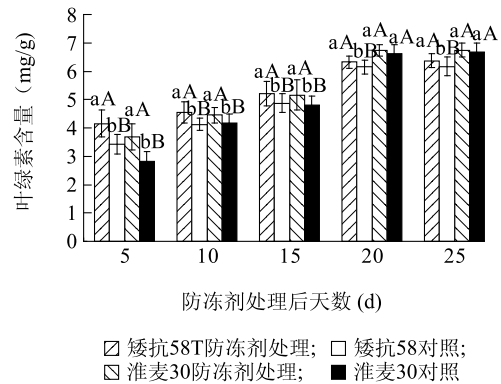
2 年试验数据基本一致,本研究选择 2014—2015 年度试验数据进行分析说明。利用 Excel 2003 和 SPSS16.0 分析软件进行数据的计算和分析,用 LSD(Least significant difference)法进行多重比较。

# 2 结果与分析

## 2.1 冻害胁迫下防冻剂对小麦叶绿素含量的影响

由图 2 可见,防冻剂处理能显著增加两小麦品种的叶绿素含量。矮抗 58 处理后,各时期各小麦品种叶绿素含量均显著高于对照( $P<0.05$ ),淮麦 30 处理后 5 d、10 d、15 d 叶绿素含量显著高于对照,处

理后 20 d、25 d 叶绿素含量增加,但不显著。表明防冻剂能够增加两小麦品种的叶绿素含量,提高小麦光合作用,增强小麦的抗寒能力。



不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示差异极显著( $P<0.01$ )。

图 2 冻害胁迫下防冻剂对小麦叶绿素含量的影响

Fig.2 Effect of antifreeze on chlorophyll contents in two wheat varieties under freezing stress

## 2.2 冻害胁迫下防冻剂对小麦叶片脯氨酸含量、SOD 活性和丙二醛(MDA)含量的影响

脯氨酸是植物体内一种重要的有机渗透调节物质,在逆境胁迫下能保护植物免受外界胁迫伤害。由图 3 可知,两小麦品种脯氨酸含量均呈先增后降的趋势。防冻剂处理提高了两小麦品种叶片中脯氨酸含量。品种间,矮抗 58 叶片中脯氨酸含量显著高于淮麦 30,说明前者较后者更耐冻,但防冻剂处理对淮麦 30 叶片中脯氨酸含量的提高较矮抗 58 显著。

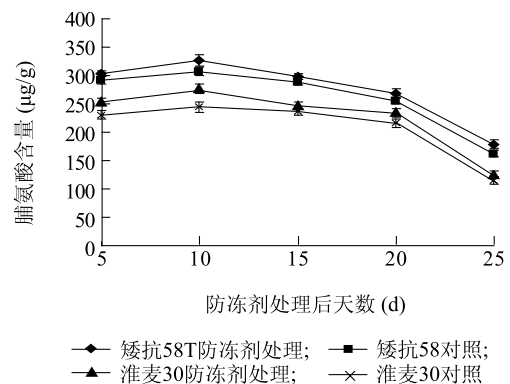


图 3 冻害胁迫下防冻剂对小麦叶片脯氨酸含量的影响

Fig.3 Effect of antifreeze on proline content in two wheat varieties under freezing stress

超氧化物歧化酶(*SOD*)是逆境胁迫下植物重要的抗氧化酶之一,在生物体内具有清除氧自由基的作用,减少活性氧对细胞的伤害。由图4可知,两小麦品种*SOD*活性均呈先增后降的趋势。防冻剂处理提高了两小麦品种的*SOD*活性,其中以处理后10 d、15 d、20 d增加最明显,矮抗58和淮麦30分别较对照提高了5.02%、12.71%、11.32%和25.47%、19.89%、15.98%。丙二醛(MDA)是植物在逆境胁迫中产生的大量自由基造成膜脂氧化的最终产物。MDA含量的大小可以反映出植物抗性强弱。由图5可知,矮抗58和淮麦30遭冻害胁迫后,叶片MDA含量逐渐增加,而防冻剂处理显著降低了两者叶片MDA含量。

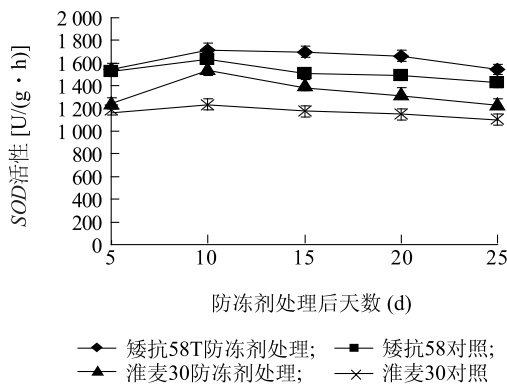


图4 冻害胁迫下防冻剂对小麦叶片*SOD*活性的影响

Fig.4 Effect of antifreeze on *SOD* activity in two wheat varieties under freezing stress

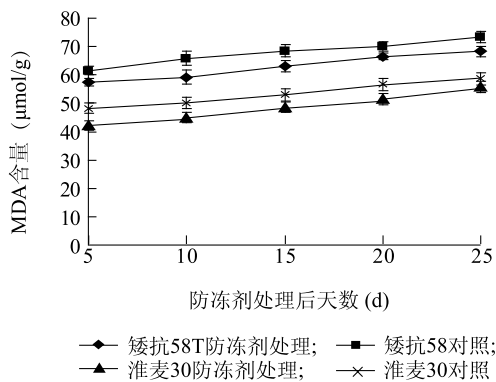


图5 冻害胁迫下防冻剂对小麦叶片丙二醛(MDA)含量的影响

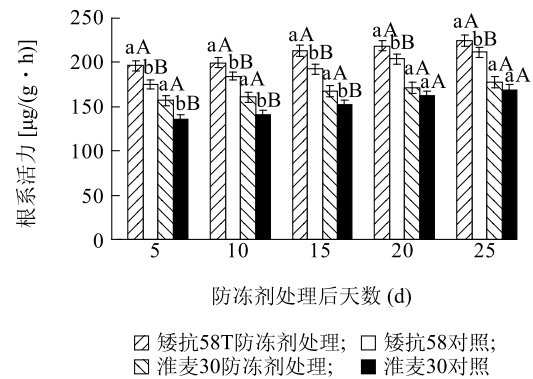
Fig.5 Effect of antifreeze on MDA content in two wheat varieties under freezing stress

可见,防冻剂处理可以显著提高两小麦品种的

脯氨酸含量和*SOD*活性,并降低MDA含量,从而保护小麦免受冻害胁迫伤害,维护体内细胞正常生理活动,提高抵抗冻害的能力。同时,防冻剂对淮麦30抗寒性的提高效果更明显。

### 2.3 冻害胁迫下防冻剂对小麦根系活力的影响

从图6可以看出,冻害胁迫下喷施防冻剂可显著提高小麦根系活力。处理后5 d、10 d、15 d矮抗58和淮麦30的根系活力显著提高,分别较对照增加11.98%、8.04%、10.95%和15.46%、14.70%、10.36%,表明防冻剂对小麦根系活力有较强的促进作用,能提高小麦抵抗冻害的能力,减少植株根系受到的伤害。



不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示差异极显著( $P < 0.01$ )。

图6 冻害胁迫下防冻剂对小麦根系活力的影响

Fig.6 Effect of antifreeze on root vigor in two wheat varieties under freezing stress

### 2.4 冻害胁迫下防冻剂对小麦营养器官中干物质积累与分配的影响

从表1可看出,两小麦品种地上部分干物质在各器官中的分配率有所不同,但在叶片、茎秆和叶鞘中干物质分配趋势基本相同,均以茎秆分配率最高,其次是叶鞘和叶片。防冻剂处理对两小麦品种各营养器官的干物质积累和分配影响不一。防冻剂处理降低了矮抗58叶片和叶鞘的干物质质量和分配率,仅增加了茎秆干物质质量和分配率;而淮麦30的叶片和茎秆的干物质质量和分配率均增加,分别增加20.95%、12.90%和16.70%、8.93%,仅降低了叶鞘的干物质分配率。由此可知,防冻剂能影响两小麦各营养器官的干物质积累和分配,尤其能提高淮麦30叶片和茎秆的干物质积累和分配,从而增强其抗寒性能。



表 1 冻害胁迫下防冻剂对小麦营养器官中干物质积累和分配的影响

Table 1 Effects of antifreeze on dry matter accumulation and distribution in the vegetative organs of wheat under freezing stress

处理		叶片				茎秆				叶鞘			
		干物质 质量(mg)	增长率 (%)	分配率 (%)	增长率 (%)	干物质 质量(mg)	增长率 (%)	分配率 (%)	增长率 (%)	干物质 质量(mg)	增长率 (%)	分配率 (%)	增长率 (%)
矮抗 58	T	242.55aA	-0.71	6.43aA	-0.89	735.33aA	2.41	19.49aA	2.22	348.99bA	-4.71	9.25aA	-4.88
	CK	244.29aA		6.49aA		718.07aA		19.06aA		366.23aA		9.72aA	
淮麦 30	T	352.39aA	20.95	8.16aA	16.70	853.88aA	12.90	19.78aA	8.93	410.68aA	1.73	9.51aA	-1.85
	CK	291.35bB		6.99bB		756.32bB		18.16bB		403.71aA		9.69aA	

T:处理;CK:对照。同一列同品种后不同小写字母和大写字母分别表示差异达显著( $P<0.05$ )和极显著( $P<0.01$ )。

## 2.5 冻害胁迫下防冻剂对小麦产量及构成因素的影响

从表 2 可以看出,矮抗 58 防冻剂处理后,其穗长、穗粒数、地上部生物学产量以及收获指数均有所增加,但都未达显著水平,而成穗数极显著增加( $P<0.01$ ),千粒质量和产量( $P<0.05$ )则显著增加。防

冻剂处理对淮麦 30 的穗长和穗粒数无显著增效,但却极显著增加了成穗数( $P<0.01$ )、千粒质量、地上部生物学产量、产量和收获指数( $P<0.05$ )。可见防冻剂对两小麦品种的产量构成因素的影响是不同的,但均能提高小麦的成穗数、穗粒数、千粒质量和产量,其中以淮麦 30 效果更佳。

表 2 冻害胁迫下防冻剂对小麦产量及构成因素的影响

Table 2 Effects of antifreeze on grain yield and its components in wheat under freezing stress

处理		穗长 (cm)	1 hm <sup>2</sup> 成穗数 ( $\times 10^6$ )	穗粒数 (粒)	千粒质量 (g)	地上部生物学产量 ( $\times 10^4$ kg/hm <sup>2</sup> )	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	收获指数
矮抗 58	T	8.95aA	7.76aA	35.7aA	41.10aA	1.430aA	6 976.5aA	0.488aA
	CK	8.92aA	7.13bB	35.1aA	40.03bA	1.415aA	6 674.0bA	0.472aA
淮麦 30	T	10.03aA	7.11aA	34.1aA	42.77aA	1.429aA	6 833.0aA	0.478aA
	CK	9.79aA	6.54bB	33.6aA	41.07bA	1.412bA	6 561.0bA	0.465bA

T:处理;CK:对照。同一列同品种后不同小写字母和大写字母分别表示差异达显著( $P<0.05$ )和极显著( $P<0.01$ )。

## 2.6 相关性分析

2.6.1 冻害胁迫下小麦各生理指标的相关性 由表 3 可知,冻害胁迫下,小麦叶绿素含量与脯氨酸含量、SOD 活性和根系活力呈显著或极显著正相关,与丙二醛(MDA)含量呈极显著负相关;MDA 含量与脯氨酸含量、SOD 活性和根系活力呈显著负相关;脯氨酸含量与 SOD 活性和根系活力呈极显著正

相关;SOD 活性与根系活力呈极显著正相关。丙二醛(MDA)含量与其他指标呈负相关,说明在冻害胁迫下,小麦植株体内 MDA 含量越高,植株受损伤的程度越大;而叶绿素含量、脯氨酸含量、SOD 活性和根系活力越高,植株抵抗冻害的能力就越显著,小麦抗寒性就越强。

表 3 冻害胁迫下小麦各生理指标的相关性

Table 3 Correlation analyses among physiological indices in wheat under freezing stress

指标	叶绿素含量	脯氨酸含量	SOD 活性	MDA 含量	根系活力
叶绿素含量	1.000				
脯氨酸含量	0.879 **	1.000			
SOD 活性	0.892 **	0.883 **	1.000		
MDA 含量	-0.857 **	-0.759 *	-0.891 **	1.000	
根系活力	0.816 *	0.921 **	0.877 **	-0.763 *	1.000

\*、\*\* 分别表示相关性达 0.05、0.01 显著水平。

2.6.2 冻害胁迫下小麦产量与其构成因素的相关性 由表 4 可知,小麦产量与穗长、成穗数、穗粒数及千粒质量呈正相关,其中与成穗数达显著正相关,与穗粒数达极显著正相关;成穗数与穗粒数和千粒质量相关不显著( $P>0.05$ );穗长与成穗数、穗

粒数和千粒质量相关不显著( $P>0.05$ );穗粒数与千粒质量相关不显著( $P>0.05$ )。冻害胁迫下,籽粒产量与成穗数和穗粒数密切正相关,即成穗数越高、穗粒数越大,小麦产量就越高,冻害对小麦产量的影响越小。

表 4 冻害胁迫下小麦产量与其构成因素的相关性

Table 4 Correlation analyses between yield and its components in wheat under freezing stress

指标	穗长	成穗数	穗粒数	千粒质量	产量
穗长	1.000				
成穗数	0.159	1.000			
穗粒数	0.374	0.311	1.000		
千粒质量	-0.218	0.536	0.531	1.000	
产量	0.325	0.783 *	0.896 **	0.673	1.000

\*、\*\* 分别表示相关性达 0.05、0.01 显著水平。

### 3 讨论

#### 3.1 冻害胁迫下防冻剂对小麦生理特征的影响

春季冻害多发生于 3 月上中旬至 4 月上中旬,是指春天气温日渐回暖的时候突然出现较强冷空气,导致外界气温突然猛烈地降低并持续这种低温天气数天的现象<sup>[16]</sup>。在本试验进行的两年中,冻害均出现在 3 月上中旬。2014 年 3 月 6 日最低气温达到 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,低温持续了 3 d。2015 年 3 月 9 日最低温度为 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,低温同样持续了 3 d。两年试验都达到了生理意义上的冻害。根据天气预报在冻害发生前的 24 h 进行了防冻剂处理。

春季冻害不仅能显著影响小麦的形态特征,还能改变其生理生化反应。研究结果表明,冻害能直接导致叶绿素合成速率减慢,导致光合作途径受到阻碍或者损伤<sup>[17]</sup>。杜永吉等<sup>[18]</sup>研究认为叶绿素含量在冻害胁迫下合成越多,该植株对冻害的抵抗能力就越强。本试验中,半冬性的矮抗 58 叶片中叶绿素含量明显高于弱春性的淮麦 30,表明矮抗 58 较淮麦 30 具有较强的抗寒能力。防冻剂处理后,两小麦品种叶片中叶绿素含量均显著提升,表明防冻剂能够促进两小麦品种叶绿素的合成,增强叶片光合作用,提高小麦植株抗寒能力,减少小麦遭受冻害的损伤。

游离氨基酸是植物生理逆境胁迫研究领域公认的植物体内重要的渗透调节物质之一,能够保护细胞进行正常的功能代谢。李小安等<sup>[19]</sup>研究发

现冻害胁迫下花苜蓿可通过提高体内游离脯氨酸含量来抵御低温伤害。本研究结果表明,防冻剂处理能显著提高两小麦品种叶片中脯氨酸含量。品种间,防冻剂处理对准麦 30 叶片中脯氨酸含量的提升较矮抗 58 高。超氧化物歧化酶(SOD)能够清除植株体内多余的活性氧自由基或超氧阴离子,维持细胞代谢的平衡。本试验表明,防冻剂处理能够显著增加矮抗 58 和淮麦 30 的 SOD 活性。同时,防冻剂处理还显著降低了矮抗 58 和淮麦 30 叶片中 MDA 含量,增强根系活力。相关性分析显示,小麦植株抗寒能力与叶绿素含量、脯氨酸含量、SOD 活性和根系活力密切相关,与 MDA 含量呈负相关。因此,防冻剂处理通过提高两小麦品种的叶绿素和游离脯氨酸含量、SOD 活性和根系活力、并降低 MDA 含量,显著增强了小麦抵抗冻害胁迫的能力,维护体内细胞正常生理活动,减少了低温冻害对小麦植株的损伤。

#### 3.2 冻害胁迫下防冻剂对小麦产量及构成因素的影响

春季冻害常发生在小麦营养生长和生殖生长并进的发育阶段,此阶段小麦主要进行幼穗的分化发育及小花的形成,是决定小麦单株有效穗数、每穗粒数及千粒质量的关键时期<sup>[20]</sup>。陈思思等<sup>[21]</sup>研究认为拔节期冻害胁迫会使小麦穗数下降,每穗粒数降低,但对千粒质量影响较小。本试验研究结果表明,防冻剂能影响小麦各营养器官的干物质积累和分配,尤其能促进淮麦 30 叶片和茎秆的干物质积累和

分配,有利于其抗寒能力的提高。试验结果还显示,防冻剂处理能增加两小麦品种的成穗数、穗粒数、千粒质量、地上部分生物量,从而提高产量和收获指数,尤其是成穗数能够显著增加,表明防冻剂能增强小麦植株抵御冻害的能力,保持植株正常的生长发育。相关性分析显示,冻害胁迫下,籽粒产量与成穗数和穗粒数密切正相关。因此,在冻害胁迫下,保持小麦成穗数和穗粒数的稳定对小麦的稳产意义重大。可见,在小麦实际生产中,通过提前喷施防冻剂可显著增加小麦叶绿素含量、游离脯氨酸含量和SOD活性,降低MDA含量,增强根系活力,从而提高小麦的抗寒能力。同时,还能确保干物质在各营养器官的正常分配和穗的正常发育,增加成穗数、穗粒数、千粒质量,提高产量和收获指数。

#### 参考文献:

- [1] 金善宝.中国小麦学[M].北京:中国农业出版社,1996:766-772.
- [2] 徐雯,杨景,邓乐乐,等.低温胁迫对扬麦16产量的影响及缓解措施研究[J].核农学报,2015,29(2):375-382.
- [3] 王永华,李金才,魏凤珍,等.小麦冻害类型、诊断特征及其预防对策与补救措施[J].中国农学通报,2006,22(4):345-348.
- [4] 蒙钟文,张静,陈怡平. CO<sub>2</sub>激光与外源NO对低温胁迫小麦的防护效应[J].中国生态农业学报,2014,22(5):566-570.
- [5] 胡丽涛.钙和钙效应剂对低温胁迫下小麦生理生化特性的影响[D].重庆:西南大学,2010.
- [6] 汤新海,杨淑萍,王振权,等.2006年睢县小麦冻害的分析与防护措施[J].现代农业科技,2008,3(3):176-177.
- [7] 马引利,余小平.外源一氧化氮对铬胁迫下小麦幼苗根系生长和抗氧化能力的影响[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2013,41(1):61-64.
- [8] 范琼花,孙万春,李兆君,等.硅对短期低温胁迫小麦叶片光合作用及其主要相关酶的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(3):544-550.
- [9] 孙学成,胡承孝,谭启玲,等.低温胁迫下钼对冬小麦光合作用特征的影响[J].作物学报,2006,32(9):1418-1422.
- [10] 李春燕,朱新开,王龙俊,等.小麦苗期、拔节期冻害诊断与防御补救措施[J].江苏农业科学,2014,42(1):71-72.
- [11] 高海涛,王育红,孟战赢,等.超高产小麦产量及旗叶生理特性的研究[J].麦类作物学报,2010,30(6):1080-1084.
- [12] 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.
- [13] 刘艳阳,李俊周,陈磊,等.低温胁迫对小麦叶片细胞膜脂质过氧化产物及相关酶活性的影响[J].麦类作物学报,2006,26(4):70-73.
- [14] 陈禹兴,付连双,王晓楠,等.低温胁迫对冬小麦恢复生长后植株细胞膜透性和丙二醛含量的影响[J].东北农业大学学报,2010,41(10):10-16.
- [15] 郑坚,陈秋夏,金川,等.不同TTC法测定枫香等阔叶树容器苗根系活力探讨[J].浙江农业科学,2008(1):39-42.
- [16] 王延训,孔庆涛,刘金良,等.小麦遭遇倒春寒的防御与补救措施[J].中国种业,2008(9):62-63.
- [17] 代玉华,刘训言,孟庆伟,等.低温胁迫对类囊体膜脂代谢的影响[J].植物学通报,2004,21(4):506-511.
- [18] 杜永吉,于磊,孙吉雄,等.结缕草3个品种抗寒性的综合评价[J].草业学报,2008,17(3):6-16.
- [19] 李小安.低温胁迫对青藏扁蓊豆与和田苜蓿种子游离脯氨酸和可溶性糖含量的影响[J].青海大学学报:自然科学版,2011,29(4):10-13.
- [20] 晋鹏宇,茹振刚,周美兰,等.春季低温阴雨对小麦产量性状的影响[J].作物研究,2010,24(2):103-108.
- [21] 陈思思.苗期和拔节期低温胁迫对扬麦16产量和生理特性的影响[D].扬州:扬州大学,2010.

(责任编辑:陈海霞)