

两种措施对华北高寒区晚茬花球甘蓝霜冻的防护效果

闫宝月¹, 宋晋辉², 刘金科³, 张立峰¹, 张继宗¹

(1. 河北农业大学农学院 河北保定 071000; 2. 河北北方学院农林科技学院 河北张家口 075000;
3. 张北县气象局 河北张家口 076450)

摘要: 伴随着市场供应期的延长, 华北高寒区晚茬青花菜与花椰菜两种花球甘蓝栽培面临着低温霜冻环境的胁迫。笔者监测了华北高寒区秋季间霜期气象因素变化, 林带风障防护、无纺布覆被防护与未防护(CK)下的花球甘蓝光合指标、霜冻害指数以及产量等特征。结果表明, 华北坝上高寒区秋季间霜期受霜冻胁迫的花球甘蓝叶片净光合速率(P_n)有降低趋势; 对花球甘蓝叶片 SPAD 值降低不显著; 对光能转化效率(F_v/F_m)产生了胁迫效应, 其中花椰菜较青花菜更为敏感, 但 F_v/F_m 总体维持 0.78 以上水平。花椰菜霜冻害指数较青花菜高, 抗寒性差; 其林带风障与无纺布覆被防护的产量较未防护(CK)提高 13.86% 与 19.98%; 青花菜林带风障防护较未防护产量提高了 6.48%。无纺布覆被增加了成本, 净产值较未防护处理提高了 27.66%, 成本收益率达 3.75%。因此, 花球甘蓝中的青花菜与花椰菜对华北高寒区秋季间霜期低温环境有较强的生态适应性, 无纺布覆被是防控菜田霜冻危害的实用技术。

关键词: 花球甘蓝; 霜冻胁迫; 无纺布覆被; 林带风障防护; 华北高寒区

中图分类号: S635

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2023)11-105-07

Effects of frost protection measures on cabbages with curd in cold region of North China

YAN Baoyue¹, SONG Jinhui², LIU Jinke³, ZHANG Lifeng¹, ZHANG Jizong¹

(1. College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China; 2. College of Agriculture and Forestry Science and Technology, Hebei Northern University, Zhangjiakou 075000, Hebei, China; 3. Zhangbei Meteorological Bureau, Zhangjiakou 076450, Hebei, China)

Abstract: With the extension of market supply period, two cabbages with curd (late-planted broccoli and cauliflower) in the high cold region of North China would be threatened by frost. Meteorological factors were monitored during the autumn frosts period in the high cold regions of North China, meanwhile photosynthetic characteristics, freeze injury index, yield and quality of these two kinds of vegetable were also investigated under three treatments including windbreaks, cover of non-textile and no-protection (CK) in this region. The results showed that when the cabbages with curd were injured by frost, the photosynthetic rate (P_n) of leaves showed a decreasing trend, but the SPAD values of leaves did not decrease significantly. There was a stress effect on the efficiency of light energy conversion efficiency (F_v/F_m), with cauliflower more sensitive than broccoli, but the values of F_v/F_m remained above 0.78 generally. The freeze injury index of cauliflower was higher than that of broccoli, because of its poor cold tolerance. The yields of windbreaks treatment and cover of non-textile treatment were 13.86% and 19.98% higher than that of no-protection treatment for the cauliflower, respectively. The yield of windbreaks treatment was 6.48% higher than that of no-protection treatment for the broccoli. Although the cover of non-textile treatment increased the cost, the net output value increased by 27.66% compared with no-protection treatment, with a cost-benefit rate of 3.75%. Therefore, broccoli and cauliflower have good ecological adaptability to the low temperature environment during the autumn frost period in the cold regions of North China, and the cover of non-textile can be one kind of practical technologies to prevent the damage of frost in vegetable production.

Key words: Cabbages with curd; Frost stress; Cover of non-textile; Windbreak; Cold region of North China

收稿日期: 2023-02-15; 修回日期: 2023-09-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1901104-5); 河北省现代农业产业技术体系露地蔬菜创新团队专项资金(HBCT2021200209)

作者简介: 闫宝月, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为集约持续耕作制度。E-mail: 2650477522@qq.com

通信作者: 张继宗, 男, 助理研究员, 主要从事农业生态与蔬菜栽培研究。E-mail: nxyzjz@163.com

华北高寒区强光、低温的农业环境,依其紧邻大中城市的区位与交通便捷的路网,被成功开发为生产冷凉蔬菜的优势区域;进一步通过满足温热带夏秋淡季需求而表现出独占性的市场优势^[1]。花球甘蓝为喜凉耐霜型蔬菜,最适生长温度为10~25℃,花球形成的最适温度为15~18℃;抗寒品种幼苗期能耐受-8℃短暂低温^[2],花球期气温低至5℃生长缓慢且能耐受短期霜冻^[3-4];夏秋季节适于在华北高寒区生产,并成为该区域的主导蔬菜品类。为延长市场供应期,大棚栽培提早上市^[5]、错期播种拉平峰值^[6]等技术创新发挥了明显作用。然而花球甘蓝的延后上市,在华北高寒区面临着低温、霜冻气候的威胁。花球甘蓝秋季间霜期^[7]的生态适应性,以及抗霜措施的效果成为迫切需要明确的问题。

设置风障能显著降低山樱、日本厚朴和广玉兰的冻害指数^[8-9],营造防护林带能长期有效地保护茶园、橘园免受寒害^[10-11]。塑料薄膜覆盖可提高葡萄、软籽石榴越冬期地温,提高莲雾叶片SOD活性,从而增强抗寒性^[12-14]。而无纺布作为新型覆盖材料能较好地替代塑料膜,实现在晚熟柑橘越冬时的保温作用,同时具有良好的透气效果^[15]。然而上述防寒措施在秋茬露地蔬菜,特别是在高寒区花球甘蓝蔬菜上的研究较少见诸报道。

笔者以晚栽花球甘蓝中的花椰菜与青花菜为研究对象,通过监测秋季间霜期气象因素变化,遮风与覆被措施下的花球甘蓝生长、光合以及产量、质量等园艺性状特征,明确花球甘蓝延后生产的可行性与保障条件,为有效利用华北高寒区晚秋地气资源、稳定提高蔬菜种植收益提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

田间试验在位于河北省张家口市张北县的河北农业大学张北试验站进行。试验区属于华北高寒气候带,海拔1420 m,年均温度为3.9℃,无霜期135 d,常年初霜期为9月12日,持续稳定霜日为10月11日;秋季间霜期 ≥ 0 ℃积温264.6℃, ≥ 10 ℃积温168.2℃。区域年降水量382.5 mm;年日照时数2907.9 h,光合有效辐射2896.8 MJ·m⁻²[16-18]。试验地土壤为壤质草甸栗钙土,pH值7.32。

1.2 材料

供试材料为花球甘蓝蔬菜的两个类型:青花菜(*Brasica oleracea* L. var. *italica* Planch.)品种为耐寒

优秀,由日本坂田种苗公司培育;花椰菜(*Brasica oleracea* L. var. *botrytis* L.)品种为富贵80,由福州比尔种苗有限公司培育。

1.3 试验设计

试验开展于2022年。青花菜6月16日穴盘育苗,7月15日田间定植;花椰菜6月11日穴盘育苗,7月11日田间定植,均为一垄双行膜下滴灌栽培方式。在2022年初霜(8月27日)后的9月15日(天气预报后几日有霜冻)设置田间试验。利用林带作为风障防护处理(防护林带长500 m,宽20 m)、覆盖白色无纺布作为覆被防护处理(覆盖时间为9月15日至9月30日,覆盖面积为3000 m²),以远离林带且不覆盖作为未防护处理(CK)。于9月29-30日,在霜冻条件下,监测花椰菜在林带风障防护措施、无纺布冠层覆盖防护措施与无防护措施3个处理和青花菜在林带风障防护措施、无防护措施2个处理下霜冻对两种蔬菜的植株光合指标、花球生产质量、病虫害危害程度等园艺性状的影响特征。

1.4 测定方法

1.4.1 光合指标测定 在各处理中,选择植株大小、长势一致的青花菜和花椰菜各5株,每株标定朝向一致的完全展开叶,作为监测光合指标的叶片。青花菜植株标定从内向外第5、第6片叶(内位叶)和第11、第12片叶(中位叶),花椰菜标定第4、第5片叶(内位叶)和第8、第9片叶(中位叶)。监测叶片分别为风障内位叶(W_i)、风障中位叶(W_m)、覆盖内位叶(C_i)、覆盖中位叶(C_m)、未防护内位叶(CK_i)、未防护中位叶(CK_m)。

在晴朗无风时,采用LI-6400XT便携式光合仪,设定LED红蓝光源的光照度为1900 μmol·m⁻²·s⁻¹,于7:00-17:00每隔2 h测定1次叶片瞬时净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r),同时记录环境大气CO₂浓度(C_i)、温度(T_a)等。

采用Hansatech公司的Pocket PEA植物效率分析仪,测定青花菜与花椰菜标定叶片的叶绿素荧光参数。叶片暗适应15 min后,用3500 μmol·m⁻²·s⁻¹的饱和光照度诱导,测定PSII的原初光能转化效率(F_v/F_m)。

按照王利立等^[19]的方法,将当日测得的叶片净光合速率和蒸腾速率分别做累计处理,得到日光合量(DPC)和日蒸腾量(DTC)。

日光合量(DPC)= $\Delta t/2 \times \sum (P_n + P_{n+1})$;P_n、P_{n+1}分别为相邻两次测定的叶片净光合速率。

日蒸腾量(DTC)= $\Delta t/2 \times \sum (T_n + T_{n+1})$; T_n 、 T_{n+1} 分别为相邻两次测定的叶片蒸腾速率。

使用 SPAD-502 便携式叶绿素分析仪测定青花菜与花椰菜标定叶片的叶绿素相对含量(SPAD),测定时间为 10:00,每片叶测量 3 次。

1.4.2 霜冻危害程度测定 借鉴病情指数概念,按 9 级标准调查与评估青花菜、花椰菜霜冻害程度^[20]。

霜冻害指数/%= $[\sum(\text{各级霜冻害叶数} \times \text{相对级数的代表值}) / (\text{总叶数} \times \text{最高级数的代表值})] \times 100$ 。

1.4.3 园艺性状测定 按照市场商品规格,青花菜花球球径 10~12 cm,单球质量 450~550 g;花椰菜花球球径 15~20 cm,单球质量 1000~1500 g 作为采收与

计产标准。2022 年最后一次采收时间为 9 月 30 日。

百株虫数/只=调查总虫数/调查总株数 $\times 100$ 。

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 20 统计分析。

2 结果与分析

2.1 秋季间霜期的气候特征

从图 1 可以看出,2022 年华北高寒区初霜日为 8 月 27 日,最低温度 $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,9 月 20—24 日连续 4 d 出现霜冻,最低温度 $-3.9\sim -1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;自 10 月 3 日后连续 5 日滑动平均日均温降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。统计分析表明,自 8 月 26 日至 10 月 3 日的秋季间霜期持

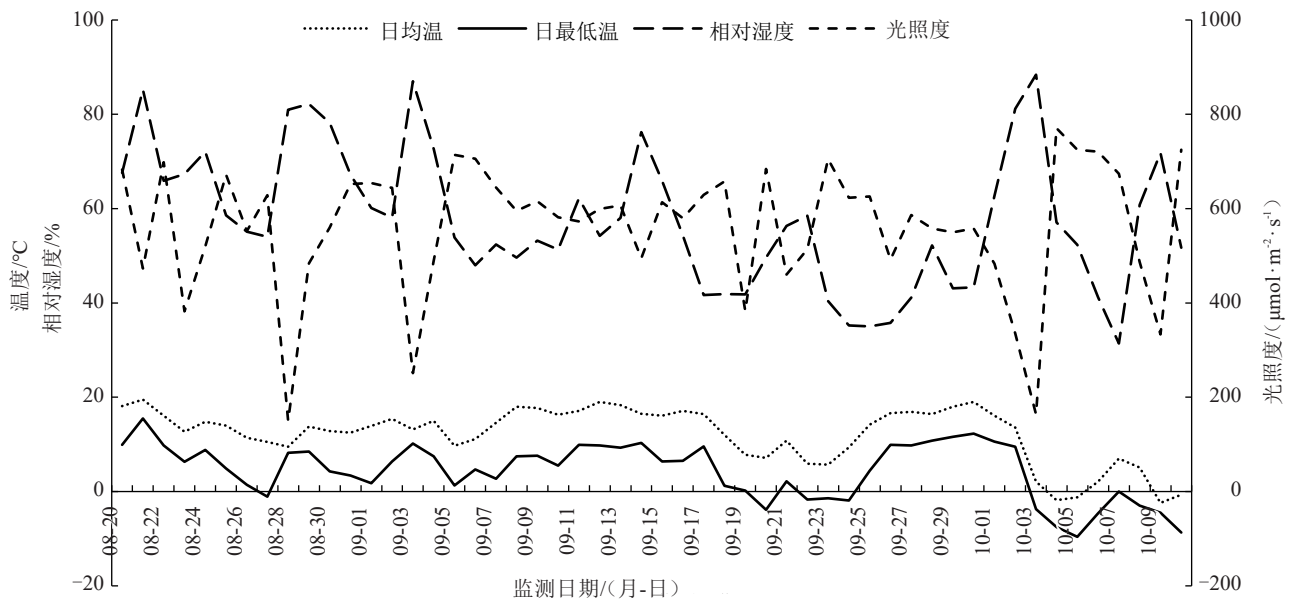


图 1 秋季间霜期环境温度、相对湿度及光照度变化

Fig. 1 Changes of air temperature, relative humidity and sunlight during frost period in autumn

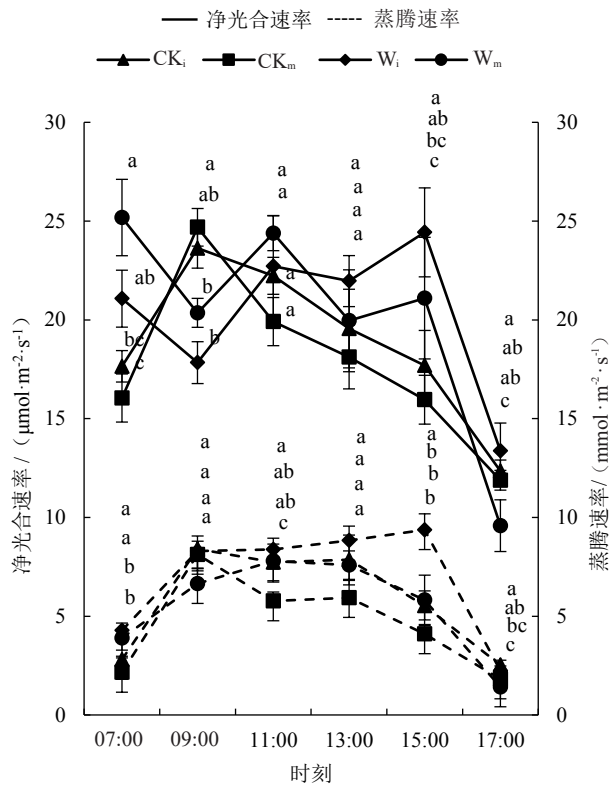
续 38 d, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为 $525.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;期间日均温 $13.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,处于花球甘蓝生长适温区间的下限;光照度平均为 $559\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,空气相对湿度平均 57.8% ,对花球紧实生长有利。9 月 20—24 日连续 4 d 的霜冻天气,会对花球甘蓝带来低温胁迫与伤害。

2.2 间霜期霜冻对花球甘蓝光合作用的影响

2.2.1 霜冻对光合与蒸腾速率的影响 对光合的监测表明(图 2),在 2022 年的秋季间霜期,青花菜未防护处理(CK)的霜冻叶片与风障防护的未霜冻叶片的净光合速率(P_n)在当日 07:00—17:00 互有高低, P_n 最高值在 $25.18\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。未防护处理的霜冻叶片净光合速率成单峰型,达到高峰期前后至 15:00 的时段光合速率较未霜冻叶片明显降低。按测定时域计,未防护霜冻叶片光合量(DPC)内位叶为 $196.23\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、中位叶为 $185.28\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,

为风障防护未霜冻内位叶($208.32\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、中位叶($206.35\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)的 $89.8\%\sim 94.2\%$ 。总体来看,霜冻的青花菜叶片的净光合速率有降低的趋势;内位叶与中位叶的净光合速率差异在 $0.47\sim 3.78\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,总体差异较小。

对花椰菜的监测表明(图 3),间霜期各处理叶片的净光合速率(P_n)在当日 07:00—17:00 呈近单峰型变化, P_n 最高值为 $26.01\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。按测定时域计,覆被防护处理的叶片 DPC 内位叶与中位叶分别为 215.08 和 $208.94\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,未防护处理的相应霜冻叶片 160.43 和 $152.97\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,覆被防护处理的叶片 DPC 内位叶与中位叶分别为未防护处理的 1.34 和 1.37 倍;风障防护处理的内位叶与中位叶 DPC 分别为 196.39 、 $170.33\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,分别为未防护处理的 1.22、1.13 倍。覆被防护与风障



注:图中不同小写字母表示不同处理间在0.05水平差异显著。下同。

图2 青花菜叶片净光合速率和蒸腾速率

Fig. 2 Net photosynthetic rate and transpiration rate of broccoli leaves

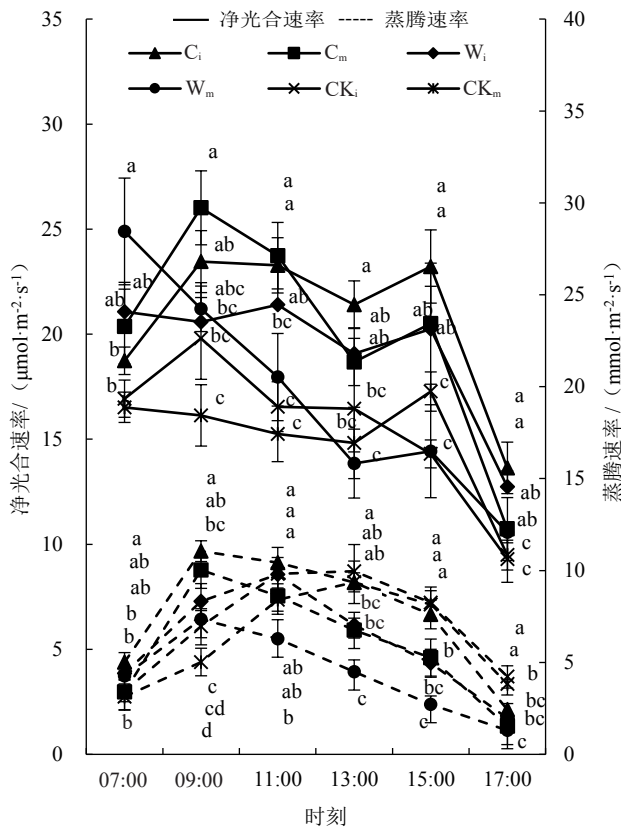


图3 花椰菜叶片净光合速率和蒸腾速率

Fig. 3 Net photosynthetic rate and transpiration rate of cauliflower leaves

防护较未防护处理(CK)降低了霜冻胁迫对 P_n 的影响。

霜冻对花球甘蓝蒸腾速率(T_r)的影响特征如图2~3。受气温影响, T_r 日变化呈单峰型。13:00时青花菜未防护(CK)的霜冻叶片与风障防护的未霜冻叶片的 T_r 值为7.55~8.83 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,按测定域计,霜冻叶片蒸腾量(DTC)平均较未霜冻叶片降低了15.3%。花椰菜各处理叶片 T_r 值为4.50~9.36 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,按测定域计,覆被与未防护处理(CK)较风障防护叶片的平均DTC值分别升高了32.3%与28.7%。霜冻胁迫下花球甘蓝蒸腾速率(T_r)有升高的趋势。

2.2.2 霜冻对叶绿素荧光参数的影响 间霜期霜冻胁迫对叶绿素荧光参数中的PSII原初光能转化效率(F_v/F_m)的影响如图4~5。监测表明, F_v/F_m 的变

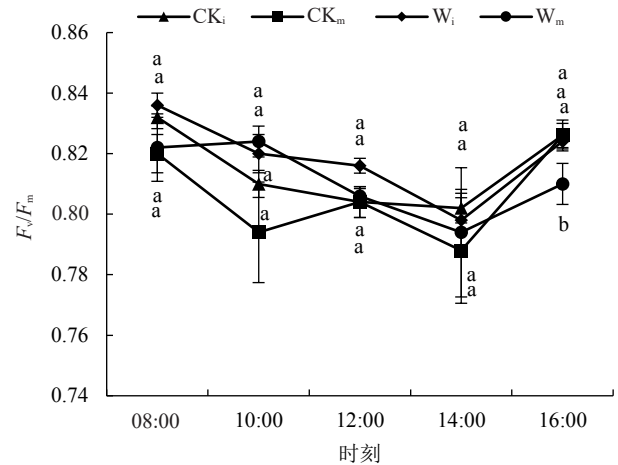


图4 青花菜叶片叶绿素荧光参数

Fig. 4 Chlorophyll fluorescence parameters of broccoli leaves

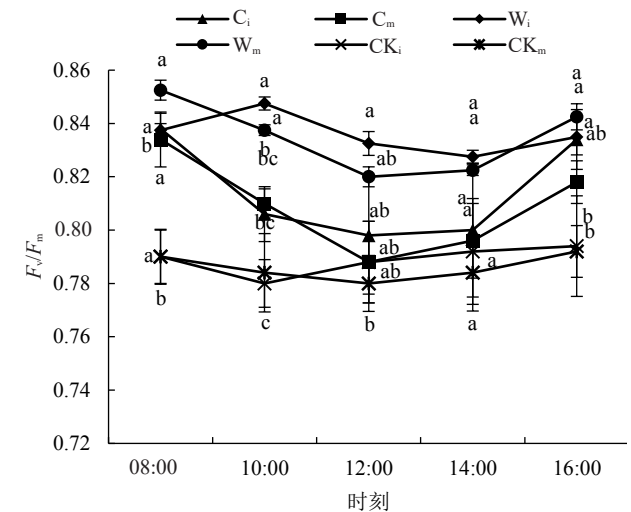


图5 花椰菜叶片叶绿素荧光参数

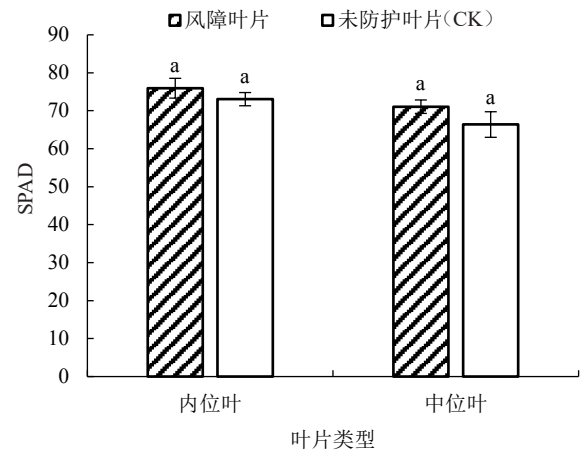
Fig. 5 Chlorophyll fluorescence parameters of cauliflower leaves

化大致呈“V”形,午后较低。当日,青花菜未防护(CK)的霜冻叶片与风障防护的未霜冻叶片的 F_v/F_m 最低值分别为 0.79 和 0.80,内位叶与中位叶 F_v/F_m 值差异在 0~0.016 之间,差异较小;测定时域内,霜冻内位叶与中位叶 F_v/F_m 均值分别为 0.814 和 0.808,与未霜冻相应叶片的 0.820、0.810 差异不显著。图 5 表明,花椰菜不同处理叶片的 F_v/F_m 最低值位于 0.78 至 0.83,内位叶与中位叶间差异不显著;测定时域内,风障防护与覆被防护处理的叶片 F_v/F_m 均值分别为 0.836 和 0.812,较未防护(CK)处理的 0.791 分别提高了 5.7%与 2.7%,差异显著。结果表明,间霜期的霜冻对青花菜与花椰菜的光能转化效率(F_v/F_m)产生了胁迫效应,花椰菜较青花菜更为敏感,但 F_v/F_m 值总体仍能维持较高水平。

2.2.3 霜冻对叶绿素相对含量的影响 霜冻对花球甘蓝叶绿素相对含量(SPAD)的影响如图 6~7。青花菜未防护处理(CK)的霜冻内位叶与中位叶 SPAD 分别为 73.06、66.38,风障防护的未霜冻内位叶与中位叶 SPAD 分别为 75.94、71.08,未防护处理(CK)的霜冻内位叶与中位叶 SPAD 较风障防护的未霜冻相应叶片分别降低了 3.8%、6.6%。统计分析表明,霜冻对青花菜叶片 SPAD 降低的效果不显著,内位叶与中位叶间差异也不显著。花椰菜不同处理的 SPAD 为 53.28~69.78,与防护处理相比,霜冻胁迫显著降低了未防护处理(CK)中位叶的 SPAD,对内位叶的 SPAD 影响不显著。

2.3 霜冻对花球甘蓝经济性状的影响

秋季霜冻胁迫对两种花球甘蓝的植株与产量性状的影响如表 1、图 8。田间跟踪监测表明,8 月 27 日的初霜未对花球甘蓝产生明显影响;9 月 20—24 日的霜冻使得叶片局部受冻死亡,花球未受伤害。花椰菜抗霜冻能力较差,未防护处理(CK)的霜冻害指数为 27.99,较青花菜高 11.11 个百分点;无纺布覆被处理的霜冻害指数为 9.05。由于花椰菜对霜冻敏感,在霜后 10 d 时间内,通过补偿性生长



注:不同小写字母表示同一叶片类型不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

图 6 青花菜叶绿素相对含量

Fig. 6 Chlorophyll content of broccoli leaves

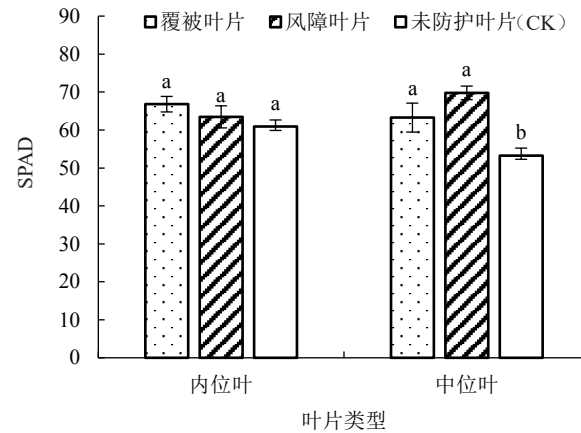


图 7 花椰菜叶绿素相对含量

Fig. 7 Chlorophyll content of cauliflower leaves

与养分转移,未防护处理(CK)的花球商品率达 63.8%。花椰菜林带风障防护与无纺布覆被防护处理的产量较未防护的 CK 分别提高了 13.86%和 19.98%,花球直径分别提高了 12.50%与 25.00%,花球质量分别提高 62.68%与 131.78%。相应青花菜由于抗寒性较强,未防护处理的花球商品率为 73.4%,林带风障防护的产量较未防护处理提高了

表 1 霜冻对花球甘蓝生产性状的影响

Table 1 Effects of frost on production characters of cabbages with curd

品种	处理	霜冻害指数/ %	百株虫数/ 只	商品率/ %	防护成本/ (万元·hm ⁻²)	花球 直径/cm	花球 质量/g	产量/ (t·hm ⁻²)	净产值/ (万元·hm ⁻²)
青花菜	风障防护	0.00		78.2		13.0	344.0	17.25 a	2.40
	未防护(CK)	16.88		73.4		11.7	316.0	16.20 a	1.98
花椰菜	风障防护	0.00		72.6		18.0	798.6	32.03 ab	5.11
	覆被防护	9.05		76.5	0.60	20.0	1 137.8	33.75 a	5.03
	未防护(CK)	27.99	6.6	63.8		16.0	490.9	28.13 b	3.94

注:表中不同小写字母表示同一作物不同处理间在 0.05 水平差异显著。



图8 无纺布覆被与花椰菜霜冻害对比

Fig. 8 Cover of non-textile and comparison of cauliflower freeze injury

6.48%，花球直径与花球质量分别较未防护提高了11.11%和8.86%。

分析表明，虽然无纺布覆被使得花椰菜生产成本增加了约0.60万元·hm²，但净产值却较未防护处理提高了27.66%，成本收益率达3.75%。

另外还发现，由于环境低温，监测期间菜田未发生病害，仅在未防护处理的花椰菜田调查到小菜蛾，百株虫数为6.6只。

3 讨论

3.1 花球甘蓝抗霜冻性能

喜凉性的花球甘蓝在华北高寒区夏秋季节生产，具有很好的生态适应性，而拓展市场供应期的露地晚秋茬生产，势必面临时期不稳定的早霜冻胁迫。本试验结果表明，秋季间霜期的霜冻胁迫会对未防护处理的叶片造成冻伤，导致PSII原初光能转化效率(F_v/F_m)表现下降的趋势^[21]，但 F_v/F_m 最低值超过0.78，接近一般作物的量值^[22]；霜冻青花菜叶片的光合性能(P_n)仍可维持在未受冻害叶片功能的89.8%以上；SPAD值超过70，与其他研究结果相似^[23]，且霜冻对其降低的影响不显著。综上所述，青花菜与花椰菜对华北高寒区秋季间霜期低温环境具有较强的生态适应性。

3.2 晚茬花球甘蓝防霜冻生产

稳定的晚茬花球甘蓝生产需要有效的防护措施。选用耐寒性强、结球期叶片内卷叠抱类型的品种，是安全生产的内因与基础^[24]，而依据短期与实时天气预报，进行田间适度防护是重要的外因与保障。本试验结果表明，利用林带作为风障具有较好的防霜冻效果，然而其防护范围也只有30m左右，并且树林的遮阴效应也部分影响了作物的产量^[25]。采用白色无纺布覆被，利用花球甘蓝冠层的自主支

撑作用，形成近地相对封闭的空间，日间能够有效增温，夜间可以反射大地热辐射^[26]，成为防控菜田霜冻危害的实用技术。

3.3 晚茬花球甘蓝水分利用的优势

华北高寒区也是水资源匮乏区，7、8月份的降水量占全年的50.3%^[27]。晚茬花球甘蓝一般于7月中旬定植在早茬菜之后，利用膜下滴灌条件进行连茬生产。如此夏季降水的土壤回补与前茬滴灌的水分累积，使晚茬花球甘蓝田具有相对充沛、稳定的土壤水环境。而随着气温的降低，花球甘蓝蒸腾速率下降，喜凉类蔬菜光合的气孔限制得以解除，且叶肉细胞活性较高^[28]；秋季间霜期的低温环境利于喜凉耐霜型作物的光合作用。这为华北高寒区水资源高效利用提供了一条可行的途径。

4 结论

华北高寒区秋季间霜期青花菜与花椰菜叶片霜冻后净光合速率(P_n)有降低趋势；但对叶片SPAD值的影响不显著。霜冻对光能转化效率(F_v/F_m)产生了胁迫效应，花椰菜较青花菜更为敏感，但 F_v/F_m 值总体仍能维持在0.78以上的较高水平。花椰菜霜冻害指数较青花菜高，抗寒性较差。花椰菜林带风障与无纺布覆被防护的产量较未防护(CK)分别提高了13.86%与19.98%；青花菜林带风障防护的产量较未防护(CK)提高了6.48%。无纺布覆被虽然增加了菜田生产成本，但净产值提高了27.66%，成本收益率可达3.75%。

参考文献

- [1] 杨志会,张继宗,张立峰,等.基于市场的华北高寒区大棚蔬菜生产策略[J].北方园艺,2018(21):181-185.
- [2] 闫凤岐,苏浴源,栗淑芳,等.张家口坝上地区青花菜标准化栽培技术[J].中国蔬菜,2018(4):82-84.

- [3] 许贵民,陈文荣,姚芳杰.青花菜栽培技术[J].吉林蔬菜,1996(6):21-22.
- [4] RUTHERFORD P P, WHITTLE R. Changes in sucrose levels as an indicator of the marketable quality of cauliflowers exposed to freezing temperatures[J]. *Scientia Horticulturae*, 1981, 14(2):117-123.
- [5] 王世春.高寒地区大棚蔬菜前套后复栽培法[J].中国蔬菜,1997(3):34-35.
- [6] 李彦.露地蔬菜套复种增产增效栽培技术[J].北方园艺,2008(7):130-132.
- [7] 崔婷婷.坝上地区农业气候资源特征及高效利用策略[D].河北保定:河北农业大学,2017.
- [8] 赵媛媛,刘明国,刘兴宇.两个园林树种防寒技术的研究[J].北方园艺,2007(6):181-182.
- [9] 周建,杨立峰.广玉兰幼树冬季防寒技术研究[J].北方园艺,2012(12):76-78.
- [10] 郭方越.寒冷季节茶树寒害、冻害的防护措施[J].河南农业,2021(4):16-17.
- [11] 陈喜靖,罗永进,柴锡周,等.两种地形上的防护林对柑橘冻害的防护作用[J].浙江农业科学,1991(1):25-27.
- [12] 李红英,段晓凤,旭花,等.贺兰山东西两麓酿酒葡萄越冬覆盖防寒措施效果对比[J].中国农业气象,2022,43(7):575-586.
- [13] 冯一峰,王艳,杨植,等.不同防寒措施对设施软籽石榴越冬性的影响[J].北方园艺,2021(10):53-58.
- [14] 章希娟,许玲,魏秀清,等.不同防寒措施对莲雾抗寒性的影响[J].中国南方果树,2019,48(5):24-27.
- [15] 曾瑶,周上铃,尹杭,等.新型环保防寒布对春见晚熟橘橙防冻效果的影响[J].果树学报,2023,40(2):252-261.
- [16] 甄文超,王秀英.气象学与农业气象学基础[M].北京:气象出版社,2006.
- [17] 王晓艺,苏正安,马菁,等.河北坝上与坝下不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J].自然资源学报,2020,35(6):1360-1368.
- [18] 马长明,马玉洁,程月明.冀西北坝上干旱区北京杨树干液流特征及影响因素分析[J].水土保持学报,2017,31(6):338-344.
- [19] 王利立,黄高宝,郭清毅,等.不同保护性耕作方式对冬小麦叶片水平水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):90-96.
- [20] 姚兆磊,张继宗,杜玉琼,等.华北寒旱区作物轮作的生产效应[J].作物学报,2020,46(12):1923-1932.
- [21] 李光庆,谢祝捷,姚雪琴,等.花椰菜叶绿素荧光参数与耐寒性的关系研究[J].园艺学报,2010,37(12):73-78.
- [22] 刘蕾蕾,纪洪亭,刘兵,等.拔节期和孕穗期低温处理对小麦叶片光合及叶绿素荧光特性的影响[J].中国农业科学,2018,51(23):4434-4448.
- [23] MOLLICA V S M, PUIATTI M, LOPES I P D C, et al. Nitrogen content, SPAD index and production of single head broccoli[J]. *Horticultura Brasileira*, 2021, 39(1):52-57.
- [24] 张新岭,李武高,卢钦灿,等.西蓝花大苗露地越冬高效栽培技术[J].北方园艺,2020(18):167-170.
- [25] 郑明,白云岗,张江辉,等.遮阴与弥雾微喷对葡萄生长生理及产量的影响研究[J].节水灌溉,2023(2):38-44.
- [26] 孙兴祥,林红梅.大棚不同覆盖物保温效果及对西瓜育苗的影响[J].中国瓜菜,2015,28(6):39-43.
- [27] 刘亚玲,信忠保,李宗善,等.近40年河北坝上地区杨树人工林径向生长对气候变化的响应差异[J].生态学报,2020,40(24):9108-9119.
- [28] 王伟婧,张继宗,郝雅星,等.华北高寒区4种根茎类喜凉作物的光合特性[J].华北农学报,2015,30(2):212-219.