

宽幅匀播对冬小麦光合及抗氧化酶活性的影响

温 健¹, 马 彦^{2*}, 张 燕¹, 李吉睿¹, 刘广才^{3*}, 周德禄³

(1. 甘肃省永登县农业技术推广中心, 甘肃 永登 730300; 2. 甘肃省农业科学院, 兰州 730070; 3. 甘肃省农业技术推广总站, 兰州 730000)

摘 要:为探明种植模式对冬小麦增产增效的调控, 本试验选用西北大面积推广种植的冬小麦品种兰天26为材料, 研究了宽幅匀播和常规条播对冬小麦旗叶光合特性、蔗糖供应水平、抗氧化酶活性和籽粒产量、品质的影响。结果表明, 与常规条播相比, 宽幅匀播种植模式下的冬小麦旗叶在灌浆中后期(花后15~35 d)能保持相对较高的净光合速率(Pn)和叶绿素SPAD值, 使Pn高值持续期(PAD)和叶绿素SPAD值相对稳定期(RSP)分别延长6.1、5.2 d。宽幅匀播处理亦降低了灌浆后期(花后15~35 d)的胞间CO₂浓度(Ci), 气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)。宽幅匀播栽培灌浆期旗叶蔗糖磷酸合成酶(SPS)活性增强, 且在灌浆中后期(花后10~35 d)维持相对较高的蔗糖供应水平。宽幅匀播处理下的旗叶过氧化氢酶(CAT)活性在整个灌浆期均高于常规条播, 并较常规条播提早5 d达到峰值, 且下降速度慢、高值持续期长, 超氧化物歧化酶(SOD)活性仅在灌浆后期(花后15~35 d)较高; 过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)质量摩尔浓度在整个灌浆期均低于常规条播, 且较常规条播延迟10 d达到丙二醛质量摩尔浓度快速上升期。宽幅匀播处理的千粒重较常规条播增加5%, 籽粒产量提高9.1%, 平均达到8 272.84 kg/hm²; 冬小麦籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、沉降值和稳定时间亦比常规条播处理增加11.9%、9.6%、11.7%和13.7%。可见, 宽幅匀播栽培的冬小麦旗叶在灌浆期具有较高的自由基清除能力, 较低的膜脂过氧化水平, 较强的光合产物供应速率、强度和较长的供应持续期, 因而有利于产量和品质的提高。

关键词:宽幅匀播; 冬小麦; 光合作用; 蔗糖; 抗氧化酶; 产量

中图分类号: S512.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2023)05-0006-06

Effects of Wide Uniform Planting on Photosynthetic Characteristics and Antioxidant Enzyme Activities of Flag Leaves in Winter Wheat

WEN Jian¹, MA Yan^{2*}, ZHANG Yan¹, LI Jirui¹, LIU Guangcai^{3*}, ZHOU Delu³

(1. Yongdeng Agro-technical Extension Center of Gansu, Yongdeng 730300; 2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070; 3. Gansu Agro-technical Extension Station, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to gain more insight into the effect planting patterns on increasing yield and efficiency of winter wheat. In our study, the effect of wide uniform planting and conventional planting pattern with the same row spacing on the photosynthetic characteristics, sucrose supply level and antioxidant enzyme activity of flag leaf were studied in field trails, using winter wheat "Lantian26" as materials. The results showed that the dynamic changes of net photosynthetic rate (Pn) and photosynthetic active duration (PAD) of flag leaves were significantly increased during the middle and late grain filling period, and the duration of Pn high value and relative stability of chlorophyll SPAD value (RSP) were prolonged respectively by 6.1 d and 5.2 d under the wide uniform planting compared to the conventional planting with the same row spacing. Wide uniform planting reduced the intercellular CO₂ concentration (Ci), stomatal conductance (Gs) and transpiration rate (Tr) in the later stage of grain filling. Moreover, the extended steady phase of chlorophyll content and the increased photosynthetic active duration in flag leaf might decelerate the aging of flag leaf, which could significantly increase its photosynthate supplying duration. Compared to the conventional planting with the same row spacing, both sucrose phosphate synthetase (SPS) activity and sucrose supplying

收稿日期: 2020-09-11

基金项目: 甘肃省农业农村厅科技项目(GNKJ-2017-8, GNKJ-2018-8)

作者简介: 温 健(1981-), 男, 高级农艺师, 硕士, 主要从事旱作农业技术与推广工作。

通讯作者: 马 彦, 男, 副研究员, E-mail: 289782884@qq.com

刘广才, 男, 博士, 研究员, E-mail: lgc633@163.com

capability of flag leaves in winter wheat under the wide uniform planting were significantly increased during the grain filling period. The results indicated that compared to wide uniform planting, the SOD and CAT activities were higher than that of the conventional planting with the same row spacing during the grain filling period, and the peak was reached 5 days earlier, the rate of decline was slow, the duration of high value was longer, while the superoxide dismutase was only higher in the late stage of grain filling period. So the lipid peroxidation level was improved, and then the flag leaf senescence was decelerated. The thousand kernel weights and yield were 5% and 9.1% higher under wide uniform planting than under the control. There was no significant difference in the number of productive ear and the kernel number between wide uniform planting and the control. Protein content, wet gluten content, sedimentation value and dough stability time were increased by 11.9%, 9.6%, 11.7% and 13.7% higher under the conventional planting pattern. Therefore, the flag leaves of winter wheat under the wide uniform planting can maintain a relatively higher photosynthate supplying rate, longer photosynthate supplying duration, lower reactive oxygen producing rate and lower lipid peroxidation level, which could be a key reason for a higher quality and yield.

Key words: Wide uniform planting; Winter wheat; Photosynthesis; Sucrose; Antioxidant enzyme activity; Yield

西北地区小麦种植面积占我国小麦总面积的13.6%,由于降水少且季节错位等问题,小麦生育后期易发生生理代谢紊乱、养分供应不足和植株早衰等,影响产量提高和品质改善^[1-2]。因此,优化小麦栽培模式,合理配置行距和密度,改善小麦生育期的光合利用和养分供应,对挖掘小麦增产潜力,缓解气候因素带来的消极影响具有重要意义。小麦宽幅匀播是甘肃省近年在干旱半干旱地区重点推广的高效栽培技术,该技术集扩行距、抓群体、促匀播为一体^[3],具有叶面积大、冠层温度低、水分和肥料利用率高等特点,增产幅度可达8%~13%^[4-5]。合理的种植密度配置是影响小麦生长发育、产量形成、品质优劣的关键因子^[6]。研究表明,小麦播种的苗带宽度显著影响植株田间分布、单株分蘖与成穗和根系生长^[4],宽幅播种亦提高了氮素利用率和水分利用效率^[7-8],等行距宽幅精播小麦分蘖数、成穗率及光合特性各指标均显著高于留套种行宽幅播种^[9],带间距也对小麦旗叶叶绿素含量和抗氧化酶活性有不同程度的影响^[10]。因此,宽幅匀播条件下如何实现小麦增产增效的生理机制尚不明确。目前,小麦宽幅匀播技术对冬小麦旗叶光合和抗氧化酶活性的研究相对较少。为此,本研究以冬小麦兰天26为试验材料,从旗叶光合特性-蔗糖代谢-抗氧化酶系统角度,进一步揭示不同栽培方式的增产机制,为探讨提高小麦光合效率、延缓植株衰老和高产高效小麦栽培技术体系提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况和试验设计

试验地位于甘肃省永登县柳树镇黑城村。该

区海拔2 010 m,无霜期112 d,年平均气温6.9℃,日照时数2 617 h,年太阳辐射总量152 kJ/cm²,年均降水量不足300 mm,属于半干旱区。试验田土壤类型为黄绵土,前茬小麦。试验以冬小麦(*Triticum aestivum* L.)品种兰天26为材料,设宽幅匀播和传统条播2个处理,宽幅匀播采用甘肃酒泉铸陇公司生产的手扶微型电动宽幅匀播机进行播种。小区面积19.8 m²(3.3 m×6 m),宽幅匀播播15行(播幅10 cm,行距22 cm),传统条播播22行,3次重复。播种量为187.5 kg/hm²,肥料播前按纯N、P₂O₅、K₂O分别为150、75、45 kg/hm²作为底肥一次施入,其他管理措施同高产小麦田。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 光合特性和叶绿素SPAD值

采用美国LI-6400型便携式光合仪测定净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)和胞间CO₂浓度(Ci),计算气孔限制值(Ls),测定时间在开花期及花后每5 d 9:00~11:00晴朗时进行,测定时样本室CO₂摩尔分数为380 μmol/mol,流速为400 μmol/(m²·s),叶片温度为25℃。每小区重复9次。叶绿素SPAD值采用日产SPAD-502型叶绿素计与光合特性同时测定。每小区重复9次。

1.2.2 蔗糖磷酸合成酶(SPS)活性和蔗糖质量分数

SPS活性参照Wardlaw等^[11]的方法测定;蔗糖质量分数采用间苯二酚法^[12]。每小区重复9次。

1.2.3 抗氧化酶活性和丙二醛(MDA)质量摩尔浓度

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性按照郭凤霞^[13]的方法测定。SOD活性以每分钟反应抑制氮蓝四唑(NBT)光还原50%为1个酶活性单位(U),用U/g表示;

POD以在470 nm处吸光度每分钟增加0.01为1个酶活性单位(U),用U/(g·min)表示;CAT以240 nm处吸光度每分钟减少0.01为1个酶活性单位(U),用U/(g·min)表示。MDA质量摩尔浓度采用硫代巴比妥酸法^[12]。每小区重复9次。

1.2.4 小麦籽粒产量和品质

小麦成熟期统计1 m双行有效穗数。成熟后各小区单打单收,并选取均匀一致的100穗小麦进行考种,调查小麦籽粒重量、穗粒数和千粒重。风干后的籽粒送甘肃省农业科学院测试中心检测。蛋白质含量、湿面筋含量、沉降值和稳定时间用瑞典Infratec TM 1241近红外谷物品质分析仪测定。

1.3 数据分析

采用Excel 2010进行数据处理与分析。

2 结果与分析

2.1 宽幅匀播对冬小麦旗叶净光合速率和叶绿素SPAD值的影响

由图1可知,2种处理在整个灌浆期冬小麦旗叶净光合速率均呈降低趋势,花后15 d降幅逐渐增大,宽幅匀播处理光合速率在整个灌浆期均高于常规条播处理。表明宽幅匀播能提高冬小麦旗叶净光合速率。以灌浆期最高值为初始值,宽幅匀播的净光合速率高值持续期(PAD)^[14]为31.2 d,常规条播为25.1 d。表明宽

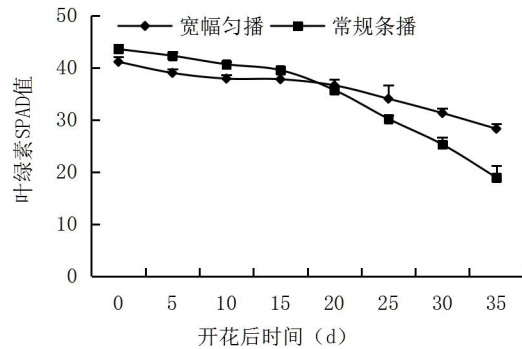
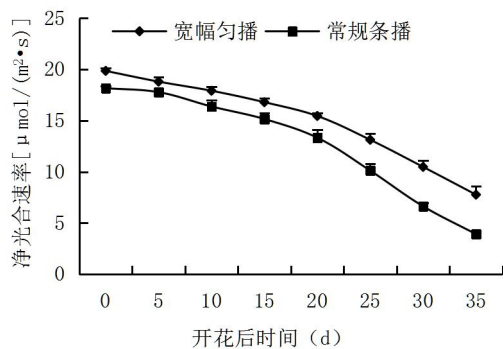


图1 不同处理对冬小麦旗叶净光合速率(Pn)和叶绿素SPAD值的影响

幅匀播栽培有利于土壤保水保肥,后期叶片衰老慢,冬小麦旗叶净光合速率高值持续期长。

随生育进程的延长,2种处理冬小麦旗叶叶

绿素SPAD值也呈下降趋势,花后20 d是分界线,前期常规条播较高,后期宽幅匀播栽培较高,整个灌浆期宽幅匀播栽培降低幅度明显小于常规条

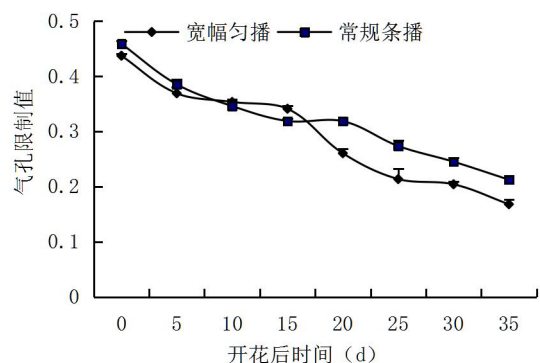
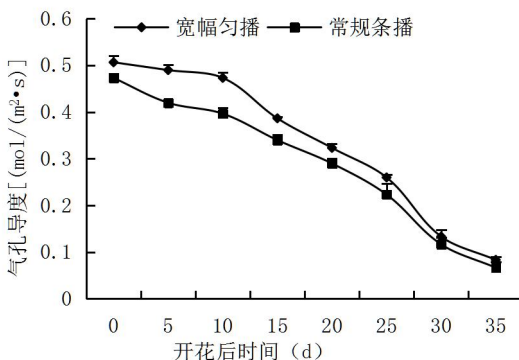
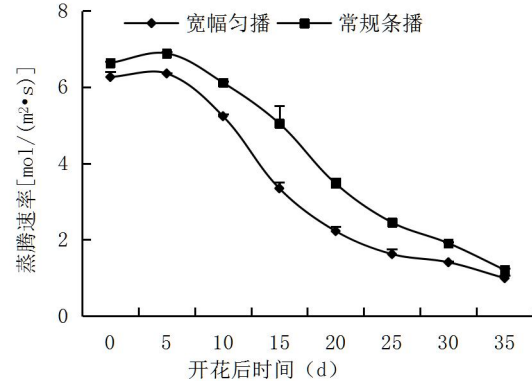
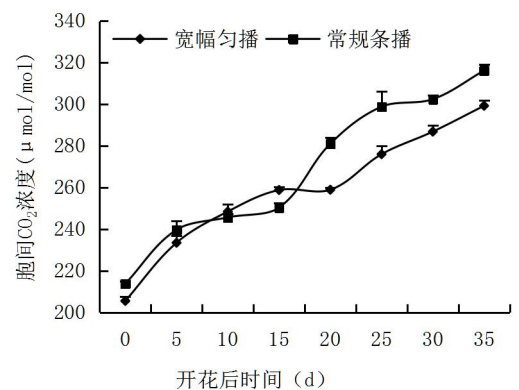


图2 不同处理对冬小麦旗叶光合特性的影响

播栽培。表明宽幅匀播栽培的小麦在灌浆后期(花后 20~35 d),旗叶也能保持较高的叶绿素 SPAD 值。以灌浆期最高值为初始值,宽幅匀播的叶绿素 SPAD 值相对稳定期(RSP)^[14]为 26.0 d,常规条播为 20.8 d。表明宽幅匀播栽培在灌浆后期能减缓叶绿素的降解,增强了光合作用,小麦旗叶叶绿素 SPAD 值相对稳定期长。

2.2 宽幅匀播对冬小麦旗叶光合特性的影响

由图 2 可以看出,随着生育进程的推进,2 种处理胞间 CO_2 浓度在盛花期最低,后逐渐增高,但宽幅匀播处理增长幅度相对较小,仅在灌浆中期(花后 10~15 d)高于常规条播。这表明在灌浆前期和后期,宽幅匀播处理旗叶更能有效利用胞间 CO_2 ,提高了光合和运输能力。冬小麦旗叶气孔导度与净光合速率变化趋势相似,宽幅匀播处理在灌浆前期(花后 0~10 d)下降缓慢,灌浆中后期急剧下降,与常规条播趋同。2 种处理旗叶蒸腾速率在花后 5 d 达到最高值,之后逐渐下降。宽

幅匀播处理旗叶蒸腾速率低于常规条播,在灌浆中后期下降更为缓慢,表明此处理土壤和植株水分状况较好。气孔限制值则交替下降。

2.3 宽幅匀播对冬小麦旗叶 SPS 活性及蔗糖质量分数的影响

由图 3 可知,2 种处理冬小麦旗叶花后 SPS 活性均快速升高,同在第 15 天达到高峰,之后剧烈下降,到灌浆末期(花后 25~35 d)下降变慢趋于一致,其中宽幅匀播栽培的变化幅度较大,在灌浆早期和中后期活性高于常规条播。宽幅匀播冬小麦旗叶花后蔗糖质量分数呈波动下降趋势,花后 10 d 有小幅回升,常规条播栽培在灌浆前期(花后 0~10 d)剧烈降低,灌浆中期(花后 10~25 d)下降趋缓,而后迅速降低至成熟。宽幅匀播在灌浆初期(花后 0~5 d)蔗糖质量分数明显低于常规条播,但灌浆中后期较高,表明宽幅匀播处理能在灌浆中后期保持相对较高的蔗糖合成能力。

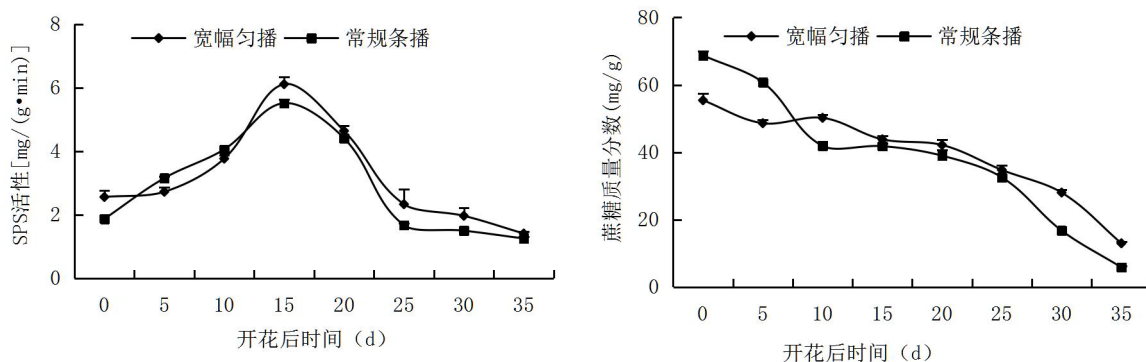


图 3 不同处理对冬小麦旗叶 SPS 活性和蔗糖质量分数的影响

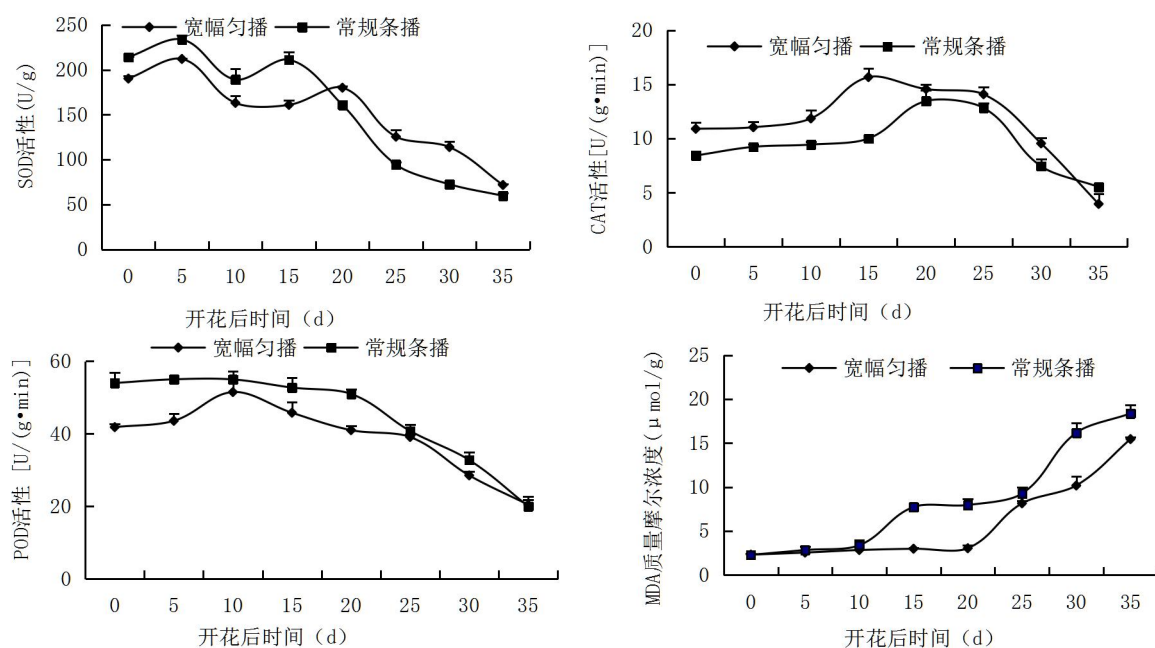


图 4 不同处理对冬小麦旗叶抗氧化酶活性和 MDA 质量摩尔浓度的影响

2.4 宽幅匀播对冬小麦旗叶抗氧化酶活性和MDA含量的影响

由图4可知,2种处理冬小麦旗叶花后SOD活性都表现为波动式双峰变化,说明SOD在抵御环境胁迫中具有较强的调节作用,宽幅匀播栽培在灌浆后期(20~35 d)对SOD活性诱导作用更强。2种处理冬小麦旗叶CAT活性均呈单峰曲线变化,峰值分别出现在花后15、20 d,宽幅匀播处理较对照提早5 d达到峰值,且下降速度较慢,高值持续期长。宽幅匀播POD活性变化呈单峰曲线,峰值出现在花后10 d,常规条播POD活性在整个灌浆期均高于宽幅匀播栽培,在灌浆前期(0~20 d)维持高值,在后期(20~35 d)迅速下降。冬小麦旗叶花后MDA质量摩尔浓度在整个灌浆期逐渐升高,

宽幅匀播在花后20 d后急剧升高,常规条播栽培呈阶梯上升,但幅度明显早于、高于宽幅匀播。

2.5 宽幅匀播对冬小麦籽粒产量和品质性状的影响

由表1可知,宽幅匀播处理平均产量为8 272.84 kg/hm²,比常规条播增产9.1%。从产量构成因素看,2种处理有效穗数、穗粒数变化不大,但宽幅匀播处理的千粒重较常规条播增长5%。宽幅匀播处理亦不同程度地提高小麦籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、沉降值和稳定时间,分别比常规条播处理增加11.9%、9.6%、11.7%和13.7%。总体看,宽幅匀播相对均衡、协调地促进了产量和品质的提高,实现较传统条播增产。

表1 不同处理下冬小麦籽粒产量和品质性状

处理	有效穗数 ($\times 10^4$ 穗/hm ²)	穗粒数	千粒重 (g)	籽粒产量 (kg/hm ²)	蛋白质含量 (%)	湿面筋含量 (%)	沉降值 (mL)	稳定时间 (min)
宽幅匀播	635.65 $\pm$ 10.81	27.21 $\pm$ 0.66	47.87 $\pm$ 0.13	8 272.84 $\pm$ 70.16	14.25 $\pm$ 0.16	32.73 $\pm$ 0.54	40.15 $\pm$ 0.71	10.36 $\pm$ 0.24
常规条播	634.99 $\pm$ 15.35	26.21 $\pm$ 0.73	45.54 $\pm$ 0.76	7 583.87 $\pm$ 163.92	12.73 $\pm$ 0.19	29.85 $\pm$ 0.36	35.95 $\pm$ 1.03	9.11 $\pm$ 0.18

3 讨论

不同品种小麦在灌浆期达到严重干旱时其旗叶净光合速率开始降低,并缩短了小麦旗叶光合速率持续期和叶绿素SPAD值相对稳定期,加速了小麦花后旗叶的衰老^[10,15],而小麦旗叶衰老推迟1 d能增产1.3%^[16]。本研究中宽幅匀播处理的冬小麦旗叶能保持相对较高的净光合速率和叶绿素SPAD值,净光合速率高值持续期和叶绿素SPAD值相对稳定期分别较常规条播延长6.1、5.2 d。可见宽幅匀播栽培在灌浆期能延缓叶绿素降解,维持相对较长的光合产物供应持续期,使后期千粒重和产量分别提高5%和9.1%,其原因一方面可能是由于宽幅播种下单株营养面积扩大,器官的营养组分厚实,植株生理代谢旺盛,延长了籽粒灌浆持续期,另一方面常规条播栽培群体结构性差、花后冠层温度相对较高,冬小麦花后高温易造成旗叶光合速率和干物质积累量降低^[17-18]。宽幅匀播处理降低了灌浆后期的胞间CO₂浓度,趋缓了灌浆初期和中后期的气孔导度与蒸腾速率,表明此处理土壤和植株水分状况较好,可弥补水分亏缺,减少脱落酸(ABA)积累和气孔关闭,促进光合合成与水分、CO₂的交换。这与于惠琳、韩惠芳等^[19-20]水分亏缺的光合特性变化和宽幅栽培具有相对较高水分利用效率的研究结果一致。气孔限制值增加而胞间CO₂浓度降低,表示光合作用

受气孔因素限制,反之则为非气孔因素限制^[21],且试验中2种处理气孔限制值均低于0.5,这可能是非气孔因素限制了气体交换。由于试验仅测定了气体交换参数,缺乏Rubsico活性、Jmax(RuBP再生能力)^[22-23]等非气孔限制指标的测定,有待今后的工作中加以弥补完善。

SPS活性的高低代表旗叶光合产物转化为蔗糖的能力,蔗糖的合成又反映此阶段同化物的输出能力^[15]。宽幅匀播栽培方式提高了灌浆期旗叶SPS活性,延缓了灌浆中后期蔗糖质量分数的下降。因此,宽幅匀播能通过提高SPS活性来促进蔗糖的合成,从而获得较强的光合产物供应强度。研究表明,不同质地土壤中养分含量、水分利用效率与小麦蔗糖代谢间存在相关作用^[24],增施有机肥或追施氮、钾等营养元素,可增加旗叶中蔗糖质量分数,提高蔗糖合成能力^[9,25-26],蔗糖的输出增加,又可提高收获指数和氮肥生产效率^[27]。可见,宽幅匀播是通过提高肥料利用率和水分利用效率,进而影响籽粒SPS活性与蔗糖合成获得高产。研究认为,干旱胁迫下花后小麦旗叶POD、CAT和SOD活性升高,旗叶气孔导度、蒸腾速率、净光合速率等显著下降^[28-29],这与本研究结果一致。宽幅匀播栽培显著提高了花后旗叶保护酶SOD和CAT活性,降低了POD活性和MDA质量摩尔浓度,使膜系统受伤害程度低,植株抗氧化系统能力增强,衰老迅降期推迟,这可能是冠层

相对低温引起,但随生育期推迟,旗叶衰老延缓的效果逐步减弱,品种间也有一定差异^[7]。

4 结 论

本研究结果表明,宽幅匀播栽培的冬小麦进入灌浆期其叶片的抗氧化酶系统启动,抗氧化酶活性显著升高,自由基清除能力增强,活性氧产生速率和膜脂过氧化水平降低,延缓了生物膜结构和功能的破坏,从而起到保护光合作用机构的作用。结合光合合成与运输顺畅,能维持较强的光合产物供应速率、强度和较长的供应持续期,可认为此时光合作用和活性氧代谢协同发挥作用,共同稳定了光合作用机构的功能,进而较高的蔗糖代谢促进了籽粒灌浆,因而产量和品质高于传统常规条播。

参考文献:

- [1] Zhang S L, Sadras V, Chen X P, et al. Water use efficiency of dry land wheat in the Loess Plateau in response to soil and crop management[J]. Field Crops Res, 2013, 151(9): 9-18.
- [2] 李念念,孙 敏,高志强,等.极端年型旱地麦田深松和覆盖播种水分消耗与植株氮素吸收、利用关系的研究[J].中国农业科学,2018,51(18):3455-3469.
- [3] 刘广才.小麦宽幅匀播高产栽培技术规程[J].甘肃农业科技,2020(7):76-79.
- [4] 孔令英,赵俊晔,于振文.宽幅播种条件下种植密度对小麦群体结构和光能利用率的影响[J].麦类作物学报,2020,40(7):1-7.
- [5] 石玉华,初金鹏,尹立俊,等.宽幅播种提高不同播期小麦产量与氮素利用率[J].农业工程学报,2018,34(17):127-133.
- [6] 赵广才,张 艳,刘利华,等.施肥和密度对小麦产量及加工品质的影响[J].麦类作物学报,2005,25(5):56-59.
- [7] 温 健,赵贵宾,马 彦,等.肥密互作对宽幅匀播旱地冬小麦产量、品质及水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2020(5):77-82.
- [8] 冯 伟,李世莹,王永华,等.宽幅播种下带间距对冬小麦衰老进程及产量的影响[J].生态学报,2015,35(8):2686-2694.
- [9] 温 健,郭振斌,张常文,等.小麦宽幅匀播技术氮、磷、钾施肥效果及推荐施肥量研究[J].中国农学通报,2016,32(18):17-22.
- [10] 郑飞娜,初金鹏,张 秀,等.播种方式与种植密度互作对大穗型小麦品种产量和氮素利用率的调控效应[J].作物学报,2020,46(3):423-431.
- [11] Wardlaw I F, Willenbrink J. Carbohydrate Storage and Mobilization by the Culm of Wheat between Heading and Grain Maturity: the Relation to Sucrose Synthase and Sucrose Phosphate-synthase[J]. Australian Journal of plant physiology, 1994, 21: 255-271.
- [12] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006:210-211.
- [13] 郭凤霞.高山冰缘植物对速冷冻响应机制的研究[D].兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2006.
- [14] 肖 凯,张树华,邹定辉.不同形态氮素营养对小麦光合特性的影响[J].作物学报,2000,26(1):53-58.
- [15] 温 健,郭振斌,郭天玲,等.全膜覆土穴播对冬小麦旗叶光合和抗氧化酶活性的影响[J].西北农业学报,2015,24(8):31-36.
- [16] 隋 娜,李 萌,田纪春,等.超高产小麦品种(系)生育后期光合特性的研究[J].作物学报,2005,31(6):808-814.
- [17] 杨晓娟,居 辉,王治世,等.花后高温和干旱对冬小麦光合、抗氧化特性及粒重的影响[J].麦类作物学报,2015,35(7):958-963.
- [18] 张晓磊,史高雷,赵治海,等.干旱胁迫对张杂谷3号及亲本光合特性及物质积累的影响[J].东北农业科学,2020,45(4):16-20.
- [19] 于惠琳,吴玉群,胡宝忱,等.水分逆境下糯玉米光合荧光系统的生理调节[J].东北农业科学,2020,45(1):8-12.
- [20] 韩惠芳,赵丹丹,沈加印,等.灌水量和时期对宽幅精播冬小麦产量及品质特性的影响[J].农业工程学报,2013,29(14):109-114.
- [21] 郭丽丽,郝立华,贾慧慧,等. NaCl胁迫对两种番茄气孔特征、气体交换参数和生物量的影响[J].应用生态学报,2018,29(12):3949-3958.
- [22] 高冠龙,冯 起,张小由,等.植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述[J].干旱区研究,2018,35(4):929-937.
- [23] 杨泽粟,张 强,郝小翠.自然条件下半干旱雨养春小麦生育后期旗叶光合的气孔和非气孔限制[J].中国生态农业学报,2015,23(2):174-182.
- [24] 李友军,熊 瑛,陈明灿,等.氮、磷、钾对豫麦50旗叶蔗糖和籽粒淀粉积累的影响[J].应用生态学报,2006,17(7):1196-1200.
- [25] 姜 东,于振文,李永庚,等.施氮水平对高产小麦蔗糖含量和光合产物分配及籽粒淀粉积累的影响[J].中国农业科学,2002,35(2):157-162.
- [26] 李 双,司转运,申孝军,等.水氮供应对灌浆期冬小麦籽粒淀粉合成相关酶活性及产量的影响[J].麦类作物学报,2018,38(4):460-468.
- [27] 曹雯梅,刘述忠,郑贝贝,等.不同高产管理模式对小麦产量形成及灌浆期糖质量分数的影响[J].西北农业学报,2015,24(10):35-41.
- [28] 晁漫宁,史新月,张健龙,等.灌浆期持续干旱对小麦光合、抗氧化酶活性、籽粒产量和品质的影响[J].麦类作物学报,2020,40(4):494-502.
- [29] 孙晓东,贾 娜,何 鹏,等.干旱胁迫对陕北沙棘幼苗生长发育的影响[J].东北农业科学,2018,43(2):16-20.

(责任编辑:王 昱)