

灌溉模式和播种密度对东北地区 春小麦光合效率及产量的影响

丰明¹,王英杰¹,王术²,庄艳¹,葛维德¹

(1.辽宁省农业科学院作物研究所,辽宁沈阳110161;2.沈阳农业大学农学院,辽宁沈阳110866)

摘要:为挖掘辽宁小麦品种增产增收潜力,以‘辽春33’春小麦为供试品种,采用二因素裂区设计,设置4种灌溉模式,包括两种喷灌模式(P1:一条喷灌带服务10行小麦,P2:一条喷灌带服务12行小麦)和两种滴灌模式(D1:一条滴灌带服务6行小麦,D2:一条滴灌带服务8行小麦),并设置4个播种密度水平:225(M1)、262(M2)、300(M3)、337 kg·hm⁻²(M4),探究播种密度及灌溉模式对春小麦光合作用及产量的影响。结果表明:同一播种密度条件下,滴灌处理的春小麦光合特性、SPAD值、叶面积指数和产量均高于喷灌处理,其中滴灌处理D2的春小麦产量较D1、P1和P2处理分别提高2.15%、4.57%和6.16%;同一灌溉模式下,M3密度处理的叶片光合特性、SPAD值、叶面积指数和产量均优于M1、M2、M4处理,增产幅度为2.44%~10.75%。D2M3处理春小麦籽粒产量达7 025.48 kg·hm⁻²,较其他处理提高1.24%~15.90%。综上,一条滴灌带服务8行小麦的滴灌方式配合300 kg·hm⁻²的播种密度可作为辽宁省推荐的春小麦种植模式。

关键词:春小麦;播种密度;灌溉模式;光合效率;籽粒产量

中图分类号:S512.1⁺2 **文献标志码:**A

Effects of irrigation mode and sowing density on photosynthetic efficiency and yield of spring wheat in Northeast China

FENG Ming¹, WANG Yingjie¹, WANG Shu², ZHUANG Yan¹, GE Weide¹

(1. Crop Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang, Liaoning 110161, China;

2. College of Agriculture, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China)

Abstract: The purpose of this study was to examine the effects of optimal seeding density and irrigation methods on wheat photosynthesis and yield, and to explore the potential for increasing the yield and profitability of the Liaoning wheat variety, ‘Liaochun 33’. The split-plot design with two factors was adopted. The irrigation modes were the main area, including two sprinkler irrigation modes (P1: one sprinkler irrigation belt served 10 rows of wheat; P2: one sprinkler irrigation belt served 12 rows of wheat) and two drip irrigation modes (D1: one drip irrigation belt served 6 rows of wheat; D2: one drip irrigation belt served 8 rows of wheat). The sowing density levels were 225(M1), 262(M2), 300(M3), and 337 kg·hm⁻²(M4). The results showed that the photosynthetic characteristics, SPAD value, leaf area index and yield of spring wheat under drip irrigation were higher than those in sprinkler irrigation. The yield of irrigation treatment D2 was 2.15%, 4.57% and 6.16% higher than D1, P1 and P2 at the same seeding density. Under the same irrigation mode, the photosynthetic characteristics, SPAD value, leaf area index and yield of M3 density treatment were better than M1, M2 and M4 treatment, with the increase ranging from 2.44% to 10.75%. The grain yield of spring wheat treated with D2M3 reached 7 025.48 kg·hm⁻², which increased by 1.24%~15.90% compared with other treatments. In conclusion, one drip irrigation belt serving 8 rows of wheat with the seeding density of 300 kg·hm⁻² can be recommended for the spring wheat planting mode in Liaoning Province.

收稿日期:2024-03-07

修回日期:2024-05-28

基金项目:辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300132);沈阳市种业创新科技专项(23-410-2-11);沈阳市农村科技特派团专项(22-319-2-38)

作者简介:丰明(1982-),男,辽宁沈阳人,副研究员,主要从事春小麦新品种选育及高产栽培技术研究。E-mail:63310265@qq.com

通信作者:葛维德(1973-),男,辽宁沈阳人,研究员,主要从事小麦及特色杂粮作物新品种选育工作。E-mail:snowweide@163.com

Keywords: spring wheat; sowing density; irrigation mode; photosynthetic efficiency; grain yield

小麦是我国重要的粮食作物,年种植面积约为 0.23 亿 hm^2 ,占世界小麦种植面积的 11%;总产量超过 1.3 亿 t,占世界小麦总产量的 17%,居全球首位^[1]。我国小麦平均单产约为 $5\,722.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,低于欧美发达国家,在当前种植面积无法有效扩大的情况下,提升小麦单产水平对保障国家粮食安全具有重要意义^[2]。

东北春小麦约占中国小麦总产量的 2.0%~2.5%,辽宁省是东北春小麦主产区,该地区春季干旱少雨且雨水分布不均,无法满足春小麦关键生育期的水分需求^[3]。合理灌溉可使小麦在开花后保持更大的有效绿叶面积,提高光能截获率,从而提供更多同化光合产物向小麦籽粒运输,以达到增产目标^[4]。作为节水高效的现代灌溉技术,喷灌和滴灌已在东北地区得到快速的推广和应用。滴灌可减少作物植株间蒸发和土壤深层渗漏,并能有效地向作物根部输送水分^[5-6]。姚素梅等^[7]研究发现,与地面灌溉相比,喷灌可显著提高冬小麦产量。合理的种植密度同样是促进小麦高产稳产和高效优质的重要技术措施,种植密度偏小会造成群体不充分、单位面积穗数较少,种植密度偏大则会导致每穗粒数和千粒重降低、单株分蘖和次生根减少、株高降低,对小麦产量造成不利影响^[8-9]。

前人对小麦光合特性和产量形成的研究多集中在耕作方式、水肥耦合和水分胁迫等方面^[10-12],关于灌溉模式和播种密度互作对春小麦光合效率及产量影响的研究还较少。为充分挖掘辽宁省春小麦高产潜力,本研究以辽宁主栽小麦审定品种‘辽春 33’为试验材料,通过不同灌溉模式及种植密度对小麦光合效率及产量的影响,揭示花后小麦旗叶光合效率及产量对不同栽培方式的响应,以期对辽宁省乃至东北春麦区小麦高产高效栽培技术的提升提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验品种

供试品种为辽宁省主栽小麦品种‘辽春 33’(辽 94 早鉴 11/辽 00-80250),由辽宁省农业科学院选育保存。

1.2 试验地概况

试验于 2021—2023 年在辽宁省农业科学院东大营街西试验地进行($41^{\circ}48'N$, $123^{\circ}25'E$,海拔 41 m),该地属北温带大陆性季风气候,年均气温 8.4°C ,无霜期 160 d 左右,日照时数 2 386 h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效年积温为 $3\,455^{\circ}\text{C}$,年辐射总量 $4\,965\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,年平均降水量 715.5 mm,春小麦生育期内日均温及降雨量变化如图 1 所示。试验地土质为壤土,前

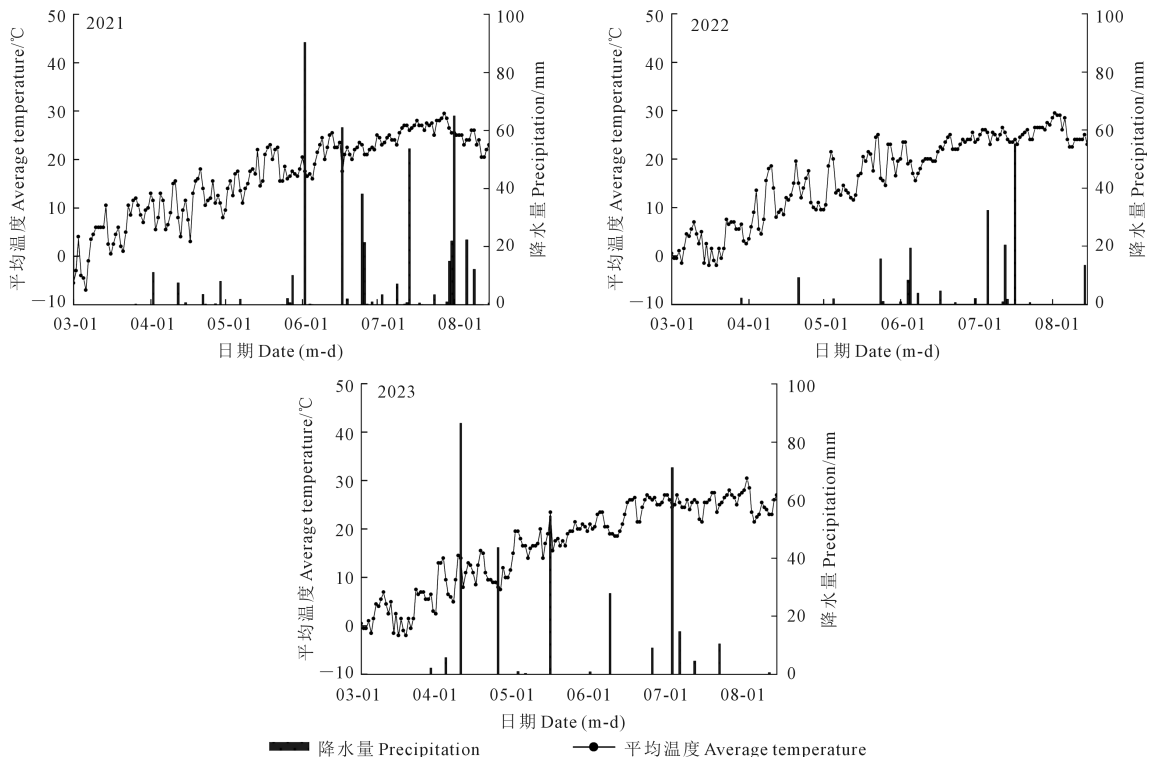


图 1 春小麦生育期间日平均温度和降水量

Fig.1 Daily average temperature and rainfall during the growth period of spring wheat

茬作物为食用豆,试验地 0~20 cm 耕层土壤基础理化性状为:有效磷含量 $34.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $171.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水解性氮含量 $39.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效锌含量 $1.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,交换性钙含量 $10.24 \text{ cmol} \cdot \text{mg}^{-1}$,氯离子含量 $0.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 $16.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,含水量 1.31%,pH 值 6.7。

1.3 试验设计

试验采用二因素裂区设计,主区为灌溉模式,设置 4 种灌溉方式,分别为喷灌 P1(一条喷灌带服务 10 行小麦,喷灌带左右两侧各 5 行)、喷灌 P2(一条喷灌带服务 12 行小麦,喷灌带左右两侧各 6 行)、滴灌 D1(一条滴灌带服务 6 行小麦,滴灌带左右两侧各 3 行)和滴灌 D2(一条滴灌带服务 8 行小麦,滴灌带左右两侧各 4 行),整个生育期灌溉 5 次,总灌溉量为 160 mm;副区为播种密度,设置 4 个水平: $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M1), $262 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M2), $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M3), $337 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M4)。共 16 个处理,每个处理重复 3 次,共计 48 个小区,小区面积 15 m^2 ($5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$),每小区 20 行,行距 0.15 m,行长 5.0 m,开沟条播;区组(重复)间隔 1 m,小区间隔 2 m,小区四周设 2 m 保护行。小麦于 2021 年 3 月 25 日播种,7 月 3 日收获;2022 年 3 月 28 日播种,7 月 7 日收获;2023 年 3 月 26 日播种,7 月 6 日收获。三个年份试验地施肥水平相同,播前基施农家肥 $45\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,纯氮为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O 为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,于整地旋耕前一次性施入。试验田其他管理措施与当地春小麦种植田一致。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 旗叶光合特性指标 开花期选择同日开花、长势均一的麦穗进行挂牌标记,每个处理选取 5 株。于开花后 0、7、14、21 d,选择晴朗无云的天气,于 9:00—11:00 采用 YMJ-PC 叶面积测定仪测定标记植株的叶面积指数(LAI);使用 SPAD-502 Plus 叶绿素测定仪测定旗叶叶绿素含量 SPAD 值,取每片旗叶上、中、下三个部位的均值;采用 LI-6800 型便捷式光合仪测定旗叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)。

1.4.2 籽粒产量 于小麦成熟期,每小区随机取 0.6 m^2 的样方统计有效穗数;每小区随机选取 20 穗,脱粒后统计穗粒数;各小区收获后随机计数 1 000 粒小麦籽粒,测定千粒重,用 PM-8188 型谷物水分测定仪测定含水量,重复 3 次,按照小麦籽粒 13% 的含水量计算理论产量。

1.5 数据统计与分析

使用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理,采用 SPSS 20.0 进行统计分析,运用 Duncan 及 LSD 方法进行显著性检验,利用 Origin 2021 进行图表绘制。产量与产量构成因素以及叶面积指数数据为 2021—2023 年均值,其余 5 个光合特性指标图片散点为三年全部测定值。

2 结果与分析

2.1 不同处理对春小麦旗叶叶面积指数的影响

如图 2 所示,随生育进程的推移,春小麦旗叶的叶面积指数(LAI)呈下降趋势。花后 0 d, D2 处理的 LAI 值最高,较其他灌溉处理增加 5.41%~19.57%;花后 0~21 d 两种滴灌处理的 LAI 值均高于喷灌处理,整体表现为 $\text{D2} > \text{D1} > \text{P1} > \text{P2}$ 。同一灌溉模式下,旗叶 LAI 随播种密度的增大呈先上升后下降的变化趋势,在 M3 处理时最大。可见,滴灌条件下‘辽春 33’旗叶叶面积指数高于喷灌,且当播种密度达到一定程度后,旗叶的叶面积指数不再增加,以 D2M3 处理的叶面积指数最高。

2.2 不同处理对春小麦旗叶叶绿素含量的影响

小麦旗叶叶绿素含量(SPAD)随发育进程推进表现为升高—缓慢下降—快速下降的趋势,各处理的 SPAD 值在花后 7 d 达到峰值,之后逐渐下降(图 3)。同一播种密度下,各灌溉模式的 SPAD 值表现为 $\text{D2} > \text{D1} > \text{P1} > \text{P2}$;同一灌溉模式下,不同播种密度处理的小麦旗叶 SPAD 值均表现为 $\text{M3} > \text{M1} > \text{M2} > \text{M4}$ 。D2M3 处理 SPAD 值高于其他处理,其花后 7 d 的 SPAD 值较 D2M1、D2M2 和 D2M4 处理分别提高 23.65%、14.79% 和 23.57%。综上,滴灌模式较喷灌可更好地提高旗叶的 SPAD 值,且适当增加密度有利于增加旗叶 SPAD 值。

2.3 不同处理对春小麦旗叶净光合速率的影响

由图 4 可知,小麦旗叶净光合速率(P_n)随生育时期的推进呈先升高后下降趋势,在花后 7 d 达到最大。同一播种密度下,各灌溉模式的小麦旗叶 P_n 表现为 $\text{D2} > \text{D1} > \text{P1} > \text{P2}$;同一灌溉模式下,不同播种密度的 P_n 表现为 $\text{M3} > \text{M1} > \text{M2} > \text{M4}$ 。其中 D2M3 处理的 P_n 高于其他处理,花后 7 d 时达到最大值 ($30.85 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),较相同时期 D2M1、D2M2 和 D2M4 处理的 P_n 分别提高 20.08%、13.83% 和 23.16%,且 D2M3 处理的 P_n 显著高于 D2M2 处理 ($P < 0.05$),极显著高于 D2M1 和 D2M4 处理 ($P < 0.01$),表明滴灌条件下适当提高播种密度可提高春小麦的净光合速率。

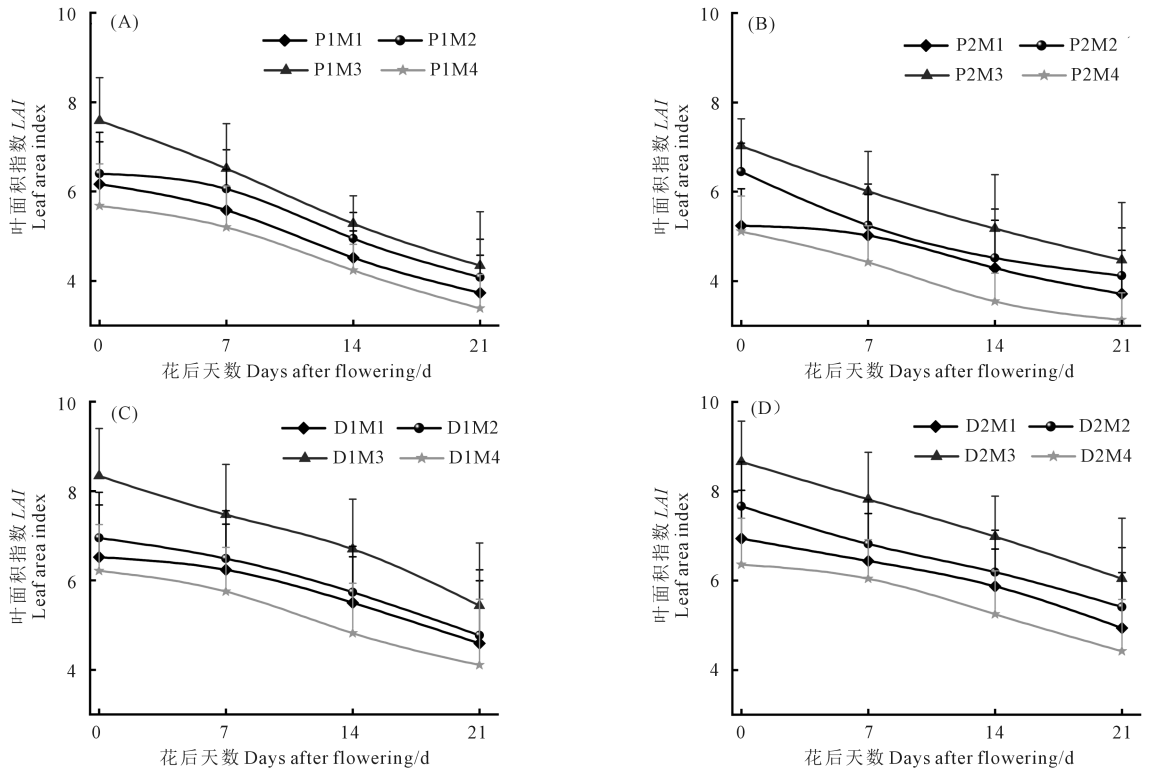
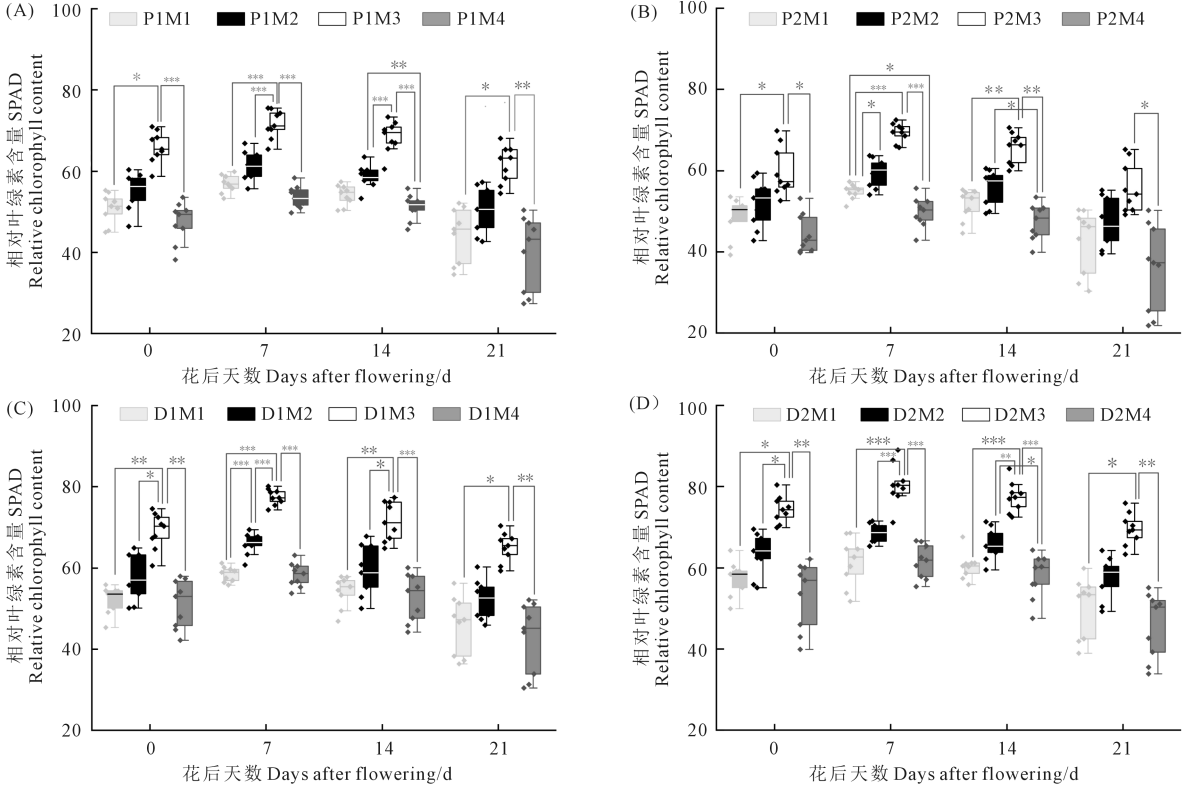


图 2 不同处理对花后春小麦旗叶叶面积指数的影响

Fig.2 Effects of different treatments on the leaf area index of flag leaves after anthesis in spring wheat



注: *、**、*** 分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$ 水平差异显著,下同。

Note: *, **, and *** indicate significant difference at $P < 0.05$, $P < 0.01$, and $P < 0.001$, respectively. The same below.

图 3 不同处理对花后春小麦旗叶 SPAD 值的影响

Fig.3 Effects of different treatments on SPAD values of flag leaves after anthesis in spring wheat

2.4 不同处理对春小麦旗叶蒸腾速率的影响

由图 5 可知,不同的灌溉模式的蒸腾速率 (T_r) 变化趋势基本一致,即从花后 0 d 开始,随生育期进

程的推进逐渐降低,且两种喷灌模式的 T_r 值低于两种滴灌模式。同一种植模式下, T_r 值随播种密度的增加呈先降低再升高后降低趋势,且蒸腾速率随花

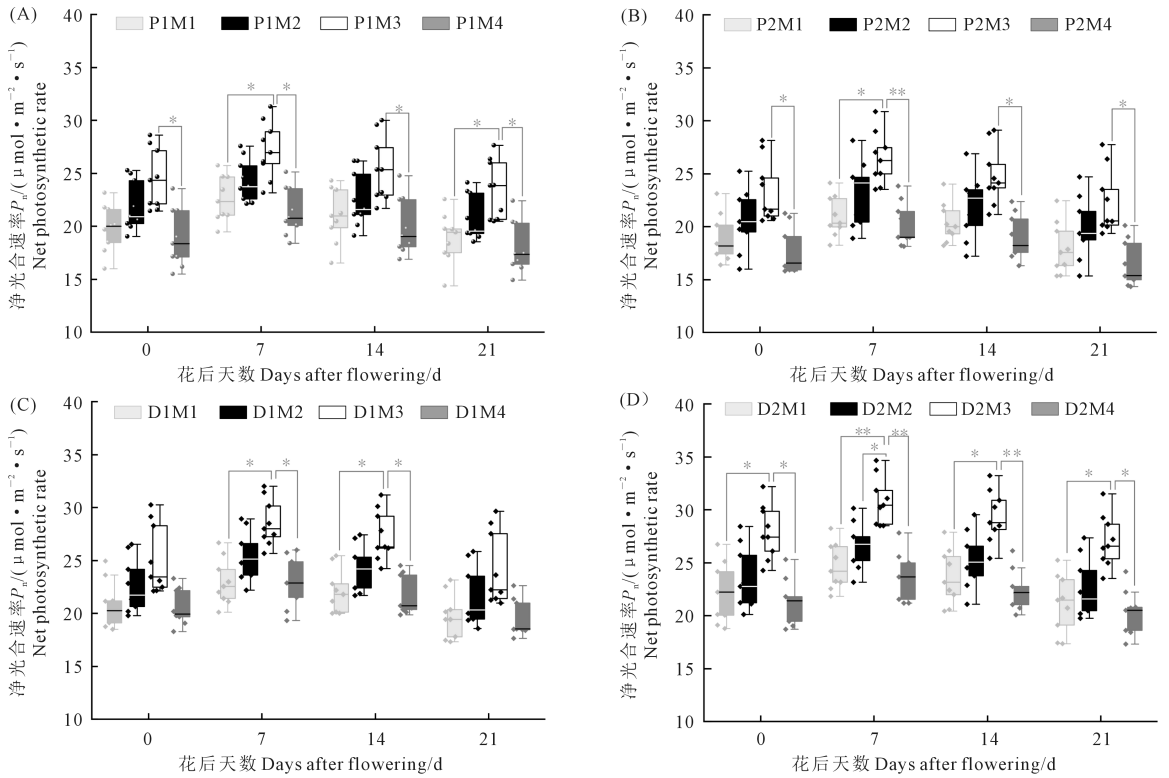


图 4 不同灌溉模式和播种密度对花后春小麦旗叶净光合速率的影响

Fig.4 Effects of different treatments on the net photosynthetic rate of flag leaves after anthesis in spring wheat

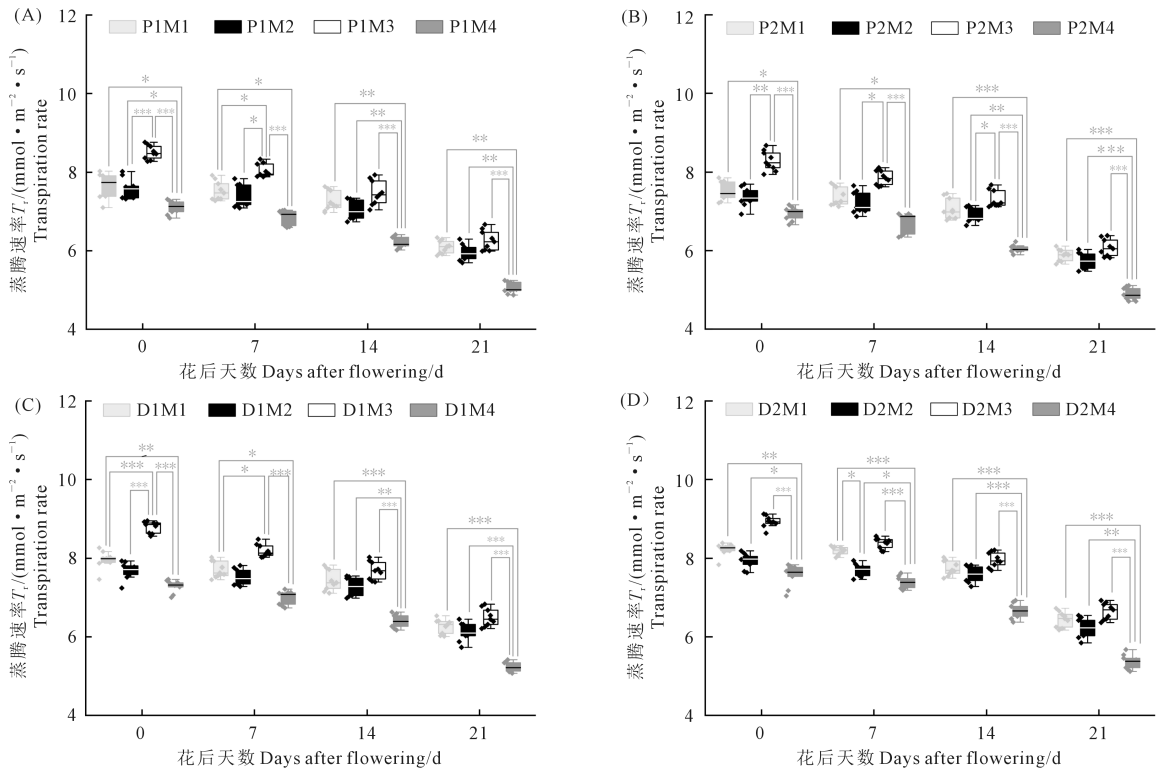


图 5 不同处理对花后春小麦旗叶蒸腾速率的影响

Fig.5 Effects of different treatments on the transpiration rate of flag leaves after anthesis in spring wheat

后天数的增加逐渐降低。相较于其他处理, M4 处理的 T_r 值在花后各时间段均为最低, 且在 P2 灌溉模式的花后 21 d 时期达到最小值 ($4.88 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), P2M4 处理的 T_r 值较 P2M1、P2M2 和 P2M3 处理分别降低 20.46%、17.50% 和 24.35%, 说明喷灌和提高播种密度会显著降低小麦旗叶的蒸腾速率。

2.5 不同处理对春小麦旗叶气孔导度的影响

气孔是植物叶片与外界进行气体交换的主要通道, 在控制植物与大气水分和能量交换之间的平衡中起着关键作用, 气孔导度是影响植物光合作用和蒸腾作用的主要因素^[13]。随生育进程的推进, 各处理小麦的旗叶气孔导度 (G_s) 变化趋势均为先升高后降低, 花后 7 d 时开始下降 (图 6)。同一播种密度下, 不同灌溉模式的小麦旗叶 G_s 表现为 $D2 > D1 > P1 > P2$; 同一灌溉模式下, 不同播种密度的旗叶 G_s 表现为 $M3 > M1 > M2 > M4$ 。花后 7 d, D2M3 处理气孔导度最大 ($425.30 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 较同期 D2M1、D2M2 和 D2M4 处理分别提高 7.78%、11.68% 和 17.52%, 其中 D2M3 与 D2M4 处理差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。

2.6 不同处理对春小麦旗叶胞间 CO_2 浓度的影响

如图 7 所示, 各处理小麦的旗叶胞间 CO_2 浓度 (C_i) 随生育进程的推进呈逐渐上升趋势, 最大值在

花后 21 d 出现, 表明开花后叶片光合作用逐渐增强, 随花后时间的不断推进, 光合作用逐渐平稳, 叶片胞间 CO_2 浓度逐渐上升。花后 21 d, 不同灌溉模式同一播种密度条件下春小麦旗叶 C_i 表现为 $P2 > P1 > D1 > D2$, 不同播种密度同一灌溉模式条件下 C_i 表现为 $M4 > M2 > M1 > M3$, 其中以 P2M4 处理的 C_i 值最大 ($372.91 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), 较同期 (花后 21 d) P2M1、P2M2 和 P2M3 处理分别提高 9.71%、4.18% 和 12.94%, P2M4 与 P2M3 处理差异显著 ($P < 0.05$)。

2.7 光合特性指标的方差分析

各项光合指标的灌溉模式 (I) 和播种密度 (M) 方差分析结果表明, 灌溉模式和播种密度均极显著影响小麦的叶面积指数、相对叶绿素含量和净光合速率, 而灌溉模式和播种密度交互可显著影响小麦净光合速率、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度 (表 1)。

2.8 不同处理对春小麦产量及其构成因素的影响

灌溉模式 (I) 显著影响小麦的穗数和产量, 播种密度 (M) 显著影响穗数、千粒重和产量, 灌溉模式和播种密度交互可显著影响小麦穗数、穗粒数、千粒重和产量 (表 2)。比较不同灌溉模式下的小麦产量及产量构成因素发现, 穗数、穗粒数、千粒重和产量的变化趋势均表现为 $D2 > D1 > P1 > P2$, 可见相比于

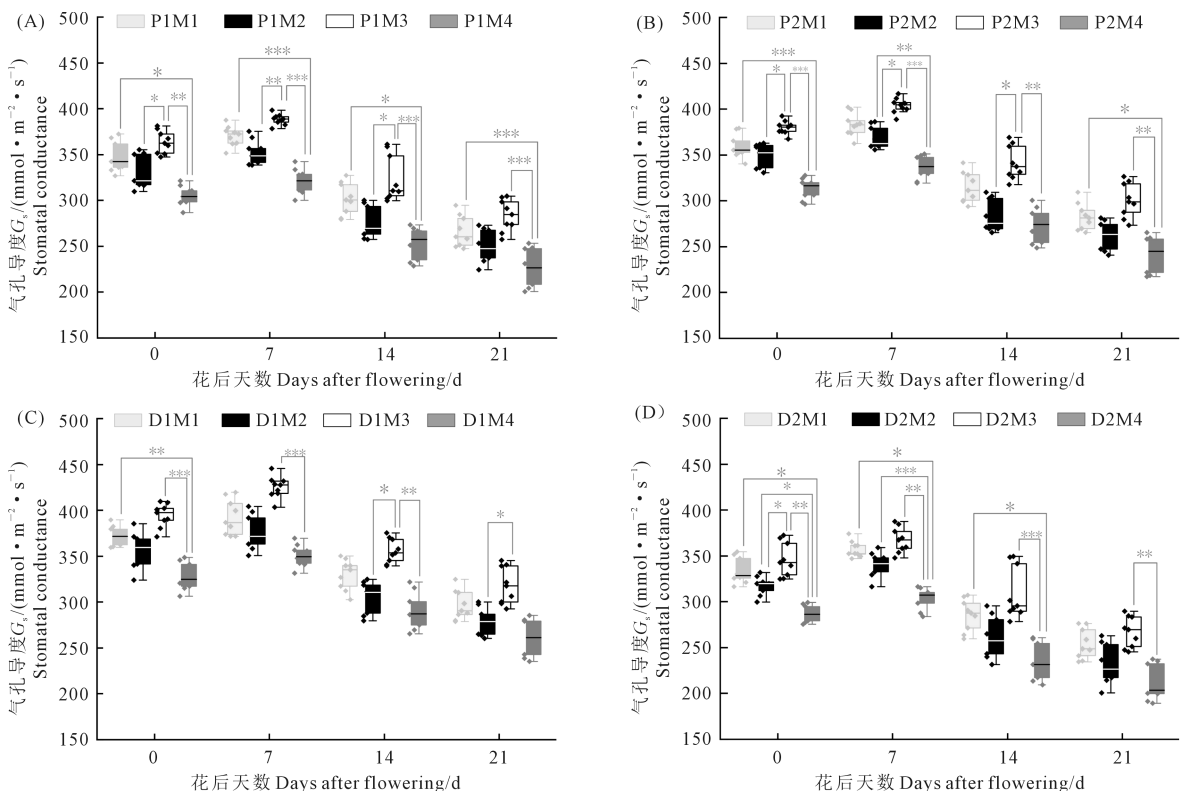


图 6 不同处理对花后春小麦旗叶气孔导度的影响

Fig.6 Effects of different treatments on stomatal conductance of flag leaves after anthesis in spring wheat

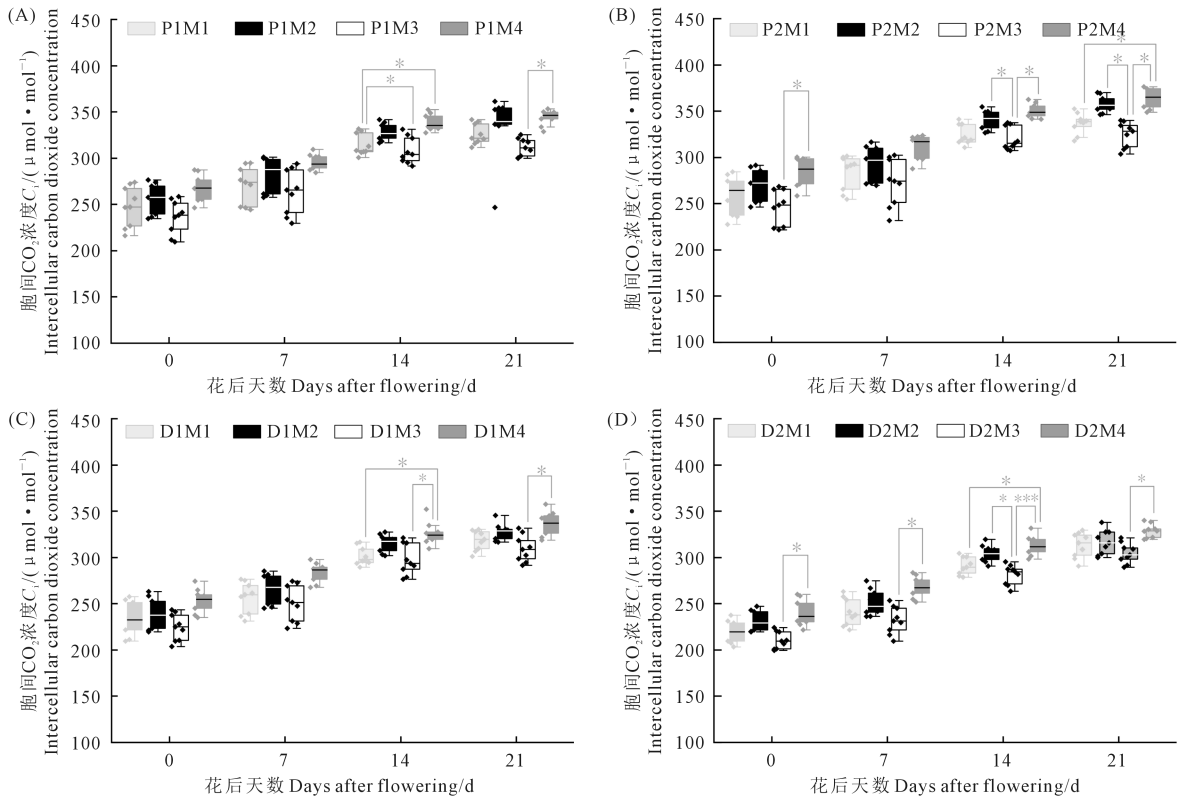
图7 不同处理对花后春小麦旗叶胞间 CO_2 浓度的影响Fig.7 Effects of different treatments on intercellular CO_2 concentration of flag leaves after anthesis in spring wheat

表1 光合特性指标的灌溉模式和播种密度方差分析

Table 1 Analysis of variance of irrigation mode and sowing density on photosynthetic characteristics indicators

指标 Index	叶面积指数 LAI	相对叶绿素含量 $SPAD$	净光合速率 P_n	蒸腾速率 T_r	气孔导度 G_s	胞间 CO_2 浓度 C_i
灌溉模式 Irrigation mode (I)	**	**	**	*	ns	ns
种植密度 Sowing density (M)	**	**	**	*	*	ns
I×M	ns	ns	*	*	ns	*

注: *、** 分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 水平差异显著, ns 表示差异不显著 ($P > 0.05$), 下同。

Note: * and ** indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. ns indicates insignificant difference ($P > 0.05$). The same below.

滴灌处理 D1 和 D2, 喷灌处理 P1 和 P2 存在降低春小麦产量的风险。同一灌溉模式下, 随播种密度的增加, 穗数、穗粒数、千粒重和产量均呈先降低后升高再降低的趋势, 各灌溉模式均在 M3 ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理时产量最高, 其中 D2M3 产量最高, 达到 $7\,025.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 穗数、穗粒数和千粒重表现最好, 分别达到 635 万穗 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 、36.33 粒和 39.88 g。

2.9 春小麦产量与光合特性指标之间的相关性

如表 3 所示, 春小麦产量与开花期旗叶的叶面积指数 (LAI)、叶绿素含量 ($SPAD$)、净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 呈极显著正相关关系, 相关系数分别为 0.795、0.672、0.677、0.871、

0.924; 而与胞间 CO_2 浓度 (C_i) 呈极显著负相关关系 (相关系数为 -0.924), 多个光合特征参数与产量的相关性均达显著水平, ‘辽春 33’ 产量与气孔导度的相关性最高, 各光合特性指标之间也表现出极显著的相关性。

3 讨论

3.1 不同灌溉模式和播种密度对春小麦产量及产量构成的影响

单位面积穗数、穗粒数和千粒重是重要的产量构成因素, 可显著影响小麦产量^[14]。田家乐^[15] 研究发现, 膜下滴灌和大田喷灌方式均能提高东北地区

表 2 不同处理对春小麦产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of different treatments on yield and yield composition factors of spring wheat

灌溉模式 Irrigation mode(I)	播种密度 Sowing density(M)	穗数 Spike number /($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Grain yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
P1	M1	589.56±12.81a	31.11±2.04ab	36.78±1.96ab	6648.47±104.27ab
	M2	575.33±17.02ab	29.89±1.71ab	35.43±1.52ab	6335.19±207.57bc
	M3	603.22±11.55a	33.44±2.59a	37.68±1.61a	6773.27±107.62a
	M4	554.00±15.90b	27.56±1.84b	34.12±1.14c	6010.27±245.58c
P2	M1	577.11±12.69a	29.56±2.01ab	35.62±1.55ab	6505.09±59.31ab
	M2	559.56±21.84ab	28.33±1.67ab	33.37±1.89b	6304.53±27.04b
	M3	588.44±12.61a	32.00±2.08a	36.32±2.12a	6618.37±91.55a
	M4	535.33±26.30c	26.33±1.86b	32.04±1.41c	5908.67±254.10c
D1	M1	602.22±12.61ab	32.56±2.01ab	38.19±1.46ab	6752.28±136.90ab
	M2	590.22±10.75bc	31.44±1.50bc	36.62±1.51ab	6523.64±201.16bc
	M3	617.44±12.74a	35.11±2.04a	39.24±1.52a	6938.57±100.03a
	M4	571.67±14.38c	28.56±1.50c	35.48±1.41b	6205.63±266.40c
D2	M1	625.56±8.64ab	34.67±1.67ab	38.94±1.54ab	6915.86±157.08a
	M2	606.78±15.22bc	33.22±1.50b	37.86±1.15ab	6701.99±193.21a
	M3	635.00±7.09a	36.33±1.67a	39.88±1.40a	7025.48±138.19a
	M4	593.00±12.39c	30.22±1.50c	36.60±1.13c	6357.71±209.21b
方差分析 ANOVA					
I		*	ns	ns	*
M		*	ns	*	**
I×M		**	*	*	**

注:同列不同小写字母表示同一灌溉模式下各处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

表 3 春小麦产量与光合特性指标之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between yield and photosynthetic characteristics of spring wheat

指标 Index	叶面积指数 LAI	叶绿素含量 SPAD	净光合速率 P_n	蒸腾速率 T_r	气孔导度 G_s	胞间 CO_2 浓度 C_i	产量 Yield
叶面积指数 LAI	1.000						
叶绿素含量 SPAD	0.897**	1.000					
净光合速率 P_n	0.854**	0.876**	1.000				
蒸腾速率 T_r	0.831**	0.844**	0.811**	1.000			
气孔导度 G_s	0.788**	0.729**	0.738**	0.901**	1.000		
胞间 CO_2 浓度 C_i	-0.818**	-0.701**	-0.675**	-0.868**	-0.940**	1.000	
产量 Yield	0.795**	0.672**	0.677**	0.871**	0.924**	-0.924**	1.000

春小麦产量,但膜下滴灌处理增产幅度更大。这可能是因为滴灌可控制根区水分状况,在生育前期能使水分均匀供应到整株根系和叶片,有利于促进小麦分蘖,同时减缓花后叶片的衰老速度,增强光合作用进而有助于生育后期营养物质的积累^[16]。本研究发现,D2处理下春小麦产量较D1、P1和P2处理分别提高2.15%、4.57%和6.16%,滴灌处理(D1和D2)的产量、穗数、穗粒数和千粒重均高于喷灌处理(P1和P2),这与前人的研究结果一致,可能是由于喷灌模式易受小麦生长高度影响,造成灌溉水分分布不均,而滴灌模式渗水较均匀,利于耕层充分持水,保证作物正常生长,从而提升产量^[17]。

陈猛等^[18]研究发现,随种植密度的增加,小麦群体有效穗数逐渐增加,穗粒数和千粒重则呈下降趋势。本研究表明,相同灌溉处理下小麦穗数、穗粒数、千粒重均在M3处理时达到最大值,产量也因播种密度水平的提高呈先增加后降低趋势,这说明适当增加播种密度可提升小麦群体产量,但过密种植不利于产量增加。本研究还发现,灌溉模式和播种密度交互显著影响产量及其构成因素,且滴灌处理后春小麦的高产和稳产性优于喷灌处理,其中D2M3处理的产量及其构成因素表现最好,说明使用“一条滴灌带服务8行小麦”的灌溉模式时,将播种密度设置为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,有利于提高春小麦产量。

3.2 不同灌溉模式和播种密度对春小麦旗叶光合特性的影响

叶面积指数影响小麦群体内光分布与利用,是小麦产量提升的基础^[19]。本研究发现,滴灌处理的叶面积指数均高于喷灌处理,这可能由于滴灌可将水分持续均匀供给至单个植株,有利于叶面积增加;同一灌溉模式下,小麦旗叶叶面积指数随播种密度增大呈先上升后下降的变化趋势,并在播种密度 300 kg·hm⁻²时达到最大,这表明密度的增加有利于小麦高叶面积指数群体的构建,但密度过大则易造成群体内部光照条件恶化,光合能力降低,加速植株衰老,从而使叶面积指数降低;各处理组合在花后 0 d 时叶面积指数最高,随发育进程的推移,旗叶叶面积指数呈下降趋势,可能由于刚开花时小麦营养生长旺盛,叶面积较大,扬花期后转入生殖生长,叶面积逐渐降低,这与前人研究结果一致^[20-21]。

较高的叶片叶绿素含量有助于延缓植株衰老,提升作物增产潜力^[22]。不同的灌溉模式和播种密度均会影响小麦的叶绿素含量。研究发现,相比于传统畦灌,滴灌条件下春小麦叶绿素含量在花期后下降较慢^[4]。随着小麦种植密度的增加,花后旗叶 SPAD 值逐渐降低^[23]。本试验结果与前人研究相似,各处理小麦旗叶 SPAD 值随发育进程推进表现为升高—缓慢下降—快速下降的趋势,在花后 7 d 达到最大,这可能因为无论何种灌溉方式均保障了小麦在营养生长向生殖生长发育关键时期的供水,旗叶生长旺盛,叶绿素含量较高,有利于产量的形成^[24]。本研究中 D2M3 处理的 SPAD 值高于其他处理,说明滴灌模式配合适宜的种植密度有利于提高旗叶叶绿素含量,延缓叶片衰老,提高春小麦光合同化能力。

光合作用是植物产量形成的生理基础,小麦籽粒产量与植株的光合作用密切相关^[24]。净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO₂ 浓度(C_i)是反映植物光合作用特性和光合产物积累情况的重要指标^[25-26],而灌溉模式与播种密度是影响植株光合作用的重要因素。位国峰等^[27]研究发现,滴灌处理下冬小麦叶片 G_s 随生育期推进呈先升高后降低的变化趋势,开花后 6 d 达到最大值; C_i 则表现为先下降后上升的趋势, T_r 在灌浆前中期持续上升,花后 24 d 达到最大值,随后迅速下降。本研究表明,小麦旗叶 P_n 和 G_s 在开花后呈先升高后下降趋势,花后 7 d 达到峰值; C_i 呈现逐渐上升的变化趋势, T_r 则随生育进程的推移逐渐下降,这与前人研

究结果存在差异^[12,27]。本研究还发现,D2M3 处理的 P_n 、 G_s 和 T_r 高于其他处理、 C_i 低于其他处理,可能是一条滴灌带服务 8 行小麦模式下单位时间入渗水量较少,水分下渗速度慢,有利于植株提高水分利用率,同时密度为 300 kg·hm⁻² 水平时,‘辽春 33’ 群体结构合理,植株光合速率提高,气孔导度增加,促进了 CO₂ 的吸收利用和蒸腾,导致 C_i 值降低;P2M4 处理的 P_n 、 G_s 和 T_r 低于其他处理、 C_i 高于其他处理,可能是喷灌模式下水分能够充分接触叶片,而加密种植导致群体过大,降低了植株叶片蒸腾速率,同时 CO₂ 浓度增高,导致 C_i 测量值升高^[28]。

相关性分析表明,小麦产量与开花期旗叶叶面积指数、叶绿素含量、 P_n 、 T_r 、 G_s 呈极显著正相关关系,与 C_i 呈极显著负相关关系。滴灌技术对改善春小麦生育后期光合特性具有良好作用,种植密度对旗叶的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 亦有显著影响,且采用较大管行比的滴灌模式和适当提升密度配置有利于高光效群体的建立,进而提升辽宁春小麦产量。

4 结 论

与其他模式相比,一条滴灌带服务 8 行小麦配合 300 kg·hm⁻² 播种密度模式可显著增加春小麦旗叶叶面积指数,改善旗叶光合特性,提高 SPAD 值,增加籽粒千粒重和穗粒数,从而显著提高春小麦产量,其中叶面积指数、SPAD 值、千粒重和穗粒数分别提高 5.54%~82.03%、6.57%~69.90%、1.61%~24.44% 和 3.00%~37.97%,产量提高 1.25%~18.90%。可见,该灌溉方式和播种密度配置可作为辽宁春小麦适宜的栽培技术进行推广应用。

参 考 文 献:

- [1] 赵广才,常旭虹,王德梅,等. 小麦生产概况及其发展[J]. 作物杂志, 2018, (4): 1-7.
ZHAO G C, CHANG X H, WANG D M, et al. General situation and development of wheat production[J]. Crops, 2018, (4): 1-7.
- [2] ZHANG S Y, ZHANG X H, QIU X L, et al. Quantifying the spatial variation in the potential productivity and yield gap of winter wheat in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(4): 845-857.
- [3] 赵丽娟,宋维富,车京玉,等. 2008-2018 年东北春麦区小麦生产与育种概况[J]. 黑龙江农业科学, 2019, (5): 146-151.
ZHAO L J, SONG W F, CHE J Y, et al. General situation of production and breeding of spring wheat in Northeast China from 2008 to 2018 [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019, (5): 146-151.
- [4] 张涛,马富裕,郑重,等. 滴灌条件下水氮耦合对春小麦光合特性及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(6): 69-73.
ZHANG T, MA F Y, ZHENG C, et al. Effects of water-nitrogen coupling on photosynthesis characteristics and yield of spring wheat under

- drip irrigation condition [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(6): 69-73.
- [5] 吴巍, 陈雨海, 李全起, 等. 垄沟耕作条件下滴灌冬小麦田间土壤水分的动态变化[J]. *土壤学报*, 2006, 43(6): 1011-1017.
- WU W, CHEN Y H, LI Q Q, et al. Dynamic changes in soil moisture in winter wheat field under conditions of drip irrigation, furrow and ridge planting[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 1011-1017.
- [6] 程裕伟, 马富裕, 冯治磊, 等. 滴灌条件下春小麦耗水规律研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(2): 112-117.
- CHENG Y W, MA F Y, FENG Z L, et al. Study on water consumption rules in spring wheat under drip irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(2): 112-117.
- [7] 姚素梅, 吴大付, 杨文平, 等. 喷灌促进小麦籽粒淀粉积累提高其品质[J]. *农业工程学报*, 2015, (19): 97-102.
- YAO S M, WU D F, YANG W P, et al. Sprinkler irrigation enhancing accumulation and quality properties of starch in wheat grain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, (19): 97-102.
- [8] 王雪莱, 郭潇潇, 郭伟, 等. 种植密度对松嫩平原西部白燕 7 号生产性能及光合特性的影响[J]. *草业科学*, 2020, 37(8): 1568-1578.
- WANG X L, GUO X X, GUO W, et al. Effect of planting density on production performance and photosynthetic characteristics of *Avena sativa* 'Baiyan No.7' in Western Songnen plain[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(8): 1568-1578.
- [9] 李志苹. 优质强筋小麦郑麦 369 播量优化试验[J]. *基层农技推广*, 2020, (5): 7-9.
- LI Z P. Experiment on seeding yield optimization of high quality strong gluten wheat 'Zhengmai 369' [J]. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2020, (5): 7-9.
- [10] 李瑞雅, 孙敏, 任爱霞, 等. 耕作模式和播种方式对旱地小麦产量形成的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(2): 17-26, 51.
- LI R Y, SUN M, REN A X, et al. Effects of tillage and seeding methods on yield formation of dryland wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(2): 17-26, 51.
- [11] 车子强, 蒋桂英, 王海琪, 等. 施氮量对滴灌春小麦茎鞘 NSC 积累与转运的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(5): 99-109, 129.
- CHE Z Q, JIANG G Y, WANG H Q, et al. Effects of nitrogen application rate on NSC accumulation and translocation in stem sheath of spring wheat under drip irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(5): 99-109, 129.
- [12] 董志强, 张丽华, 吕丽华, 等. 不同灌溉方式对冬小麦光合速率及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, (6): 1-7.
- DONG Z Q, ZHANG L H, LV L H, et al. Effects of different irrigation methods on photosynthetic rate and yield of winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, (6): 1-7.
- [13] 王瑞丽, 于贵瑞, 何念鹏, 等. 气孔特征与叶片功能性状之间关联性沿海拔梯度的变化规律——以长白山为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(8): 2175-2184.
- WANG R L, YU G R, HE N P, et al. Altitudinal variation in the covariation of stomatal traits with leaf functional traits in Changbai Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8): 2175-2184.
- [14] 杨毅轩, 陈应枝, 唐芃, 等. 播种方式对黄淮海麦区西部冬小麦氮素利用与产量形成的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(6): 1572-1582.
- YANG Y X, CHEN Y Z, TANG P, et al. Effects of sowing patterns on nitrogen utilization and yield formation of winter wheat in the western Huang-Huai-Hai region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(6): 1572-1582.
- [15] 田家乐. 不同灌溉方式对东北地区小麦生长及其产量的影响试验[J]. *水利技术监督*, 2023, (3): 137-140.
- TIAN J L. Experiment on effects of different irrigation methods on wheat growth and yield in Northeast China [J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2023, (3): 137-140.
- [16] 王冀川, 徐雅丽, 高山, 等. 滴灌条件下根区水分对春小麦根系分布特征及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(2): 21-26.
- WANG J C, XU Y L, GAO S, et al. Effects of soil moisture of root zone on root growth and yield of spring wheat under drip irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(2): 21-26.
- [17] 张光岩, 李俊良, 徐良菊, 等. 不同灌溉模式对小麦干物质积累及产量经济效益的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(7): 31-38.
- ZHANG G Y, LI J L, XU L J, et al. Effects of different irrigation modes on dry matter accumulation and yield economic benefit of wheat [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(7): 31-38.
- [18] 陈猛, 梁雪齐, 李玲, 等. 种植密度对匀播冬小麦干物质积累、转运及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2021, 41(2): 238-244.
- CHEN M, LIANG X Q, LI L, et al. Effect of planting density on dry matter accumulation, translocation and grain yield of uniformly sown winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(2): 238-244.
- [19] 郭天财, 盛坤, 冯伟, 等. 种植密度对两种穗型小麦品种分蘖期茎蘖生理特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2009, 29(2): 350-355.
- GUO T C, SHENG K, FENG W, et al. Effects of plant density on physiological characteristics of different stems during tillering stage in two spike-types winter wheat cultivars [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(2): 350-355.
- [20] 刘红杰, 任德超, 葛君, 等. 积温和播种密度对小麦越冬前生长状况的影响[J]. *作物杂志*, 2024, (1): 141-147.
- LIU H J, REN D C, GE J, et al. Effects of accumulated temperature and planting density on pre-winter growth of wheat [J]. *Crops*, 2024, (1): 141-147.
- [21] 赵会杰, 郭天财, 刘华山, 等. 大穗型高产小麦群体的光照特征和生理特性研究[J]. *河南农业大学学报*, 1999, 33(2): 101-105.
- ZHAO H J, GUO T C, LIU H S, et al. Influence of density on light distribution and some physiological characteristics in wheat canopy with heavy-ear cultivars [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 1999, 33(2): 101-105.
- [22] 陈晓平, 杨德龙, 栗孟飞, 等. 干旱胁迫条件下小麦 RILs 群体花后旗叶持绿性遗传特性及其与千粒重的相关性[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, (6): 57-63.
- CHEN X P, YANG D L, LI M F, et al. Genetical characteristic of stay-green of flag leaf after flowering in recombinant inbred lines

- (RILs) of wheat and its correlation analysis with grain weight under drought stress[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, (6): 57-63.
- [23] 熊淑萍, 孟香苹, 王小纯, 等. 小麦玉米一体化群体配置对小麦冠层结构和产量影响[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(8): 970-978. XIONG S P, MENG X P, WANG X C, et al. Effects of wheat and maize integrated population patterns on the canopy structure and yield of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(8): 970-978.
- [24] 方静, 史功赋, 魏淑丽, 等. 干旱胁迫对春小麦旗叶生理特征及其根系抗旱基因表达特征的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(3): 46-55. FANG J, SHI G F, WEI S L, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics of flag leaves and expression characteristics of drought-resistance genes in roots of spring wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3): 46-55.
- [25] 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 等. 黄淮海区冬小麦超高产栽培的理论与实践[J]. *作物学报*, 2002, 28(5): 577-585. YU Z W, TIAN Q Z, PAN Q M, et al. Theory and practice on cultivation of super high yield of winter wheat in the wheat fields of Yellow river and Huaihe river districts[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(5): 577-585.
- [26] 张其德, 蒋高明, 朱新广, 等. 12个不同基因型冬小麦的光合能力[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 532-536. ZHANG Q D, JIANG G M, ZHU X G, et al. Photosynthetic capability of 12 genotypes of *Triticum aestivum*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001, 25(5): 532-536.
- [27] 位国峰, 刘义国, 姜雯, 等. 不同滴灌制度对冬小麦光合特性及水分利用效率的影响[J]. *华北农学报*, 2013, (5): 149-156. WEI G F, LIU Y G, JIANG W, et al. Effects of different drip irrigation system on photosynthesis characteristics and water use efficiency of winter wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, (5): 149-156.
- [28] LIU H J, KANG Y H. Effect of sprinkler irrigation on microclimate in the winter wheat field in the North China plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84(1/2): 3-19.

(上接第68页)

- [15] Willey R W. Intercropping-its importance and research needs, part1: competition and yield advantages[Z]. *Field Crop Abstracts*, 1979: 1-10.
- [16] HECTOR A, SCHMID B, BEIERKUHNEIN C, et al. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands[J]. *Science*, 1999, 286(5442): 1123-1127.
- [17] TILMAN D, KNOPS J, WEDIN D, et al. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes[J]. *Science*, 1997, 277(5330): 1300-1302.
- [18] ZHAO J, CHEN J, BELLLOUIN D, et al. Global systematic review with meta-analysis reveals yield advantage of legume-based rotations and its drivers[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4926.
- [19] LIU C Y, FENG X M, XU Y, et al. Legume-based rotation enhances subsequent wheat yield and maintains soil carbon storage[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(5): 64.
- [20] CHEN J, LÆRKE P E, JORGENSEN U. Optimized crop rotations increase biomass production without significantly changing soil carbon and nitrogen stock[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 10.
- [21] KAZEMI H, KLUG H, KAMKAR B. New services and roles of biodiversity in modern agroecosystems: a review[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 1126-1135.
- [22] ZHANG W P, GAO S N, LI Z X, et al. Shifts from complementarity to selection effects maintain high productivity in maize/legume intercropping systems[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 58(11): 2603-2613.
- [23] LIU X, RAHMAN T, SONG C, et al. Relationships among light distribution, radiation use efficiency and land equivalent ratio in maize-soybean strip intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2018, 224: 91-101.
- [24] THILAKARATHNA M S, MCELROY M S, CHAPAGAIN T, et al. Belowground nitrogen transfer from legumes to non-legumes under managed herbaceous cropping systems: a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36(4): 58.
- [25] WANG Y Z, ZHANG Y P, ZHANG H F, et al. Intercropping-driven nitrogen trade-off enhances maize productivity in a long-term experiment[J]. *Field Crops Research*, 2022, 287: 108671.
- [26] WANG X Y, GAN Y T, HAMEL C, et al. Water use profiles across the rooting zones of various pulse crops[J]. *Field Crops Research*, 2012, 134: 130-137.
- [27] MALHI S S, LEMKE R. Tillage, crop residue and N fertilizer effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality and nitrous oxide gas emissions in a second 4-yr rotation cycle[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96(1/2): 269-283.
- [28] LASISI A, LIU K. A global meta-analysis of pulse crop effect on yield, resource use, and soil organic carbon in cereal- and oilseed-based cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2023, 294: 108857.
- [29] WANG W, LI M Y, ZHANG W, et al. Soil moisture drives the shift from selection to complementarity effect in the rainfed maize/faba bean intercropping system[J]. *Plant and Soil*, 2024, 499(1): 313-328.
- [30] 赵建华, 孙建好, 陈亮之, 等. 玉/豆间作产量优势中补偿效应和选择效应的角色[J]. *作物学报*, 2022, 48(10): 2588-2596. ZHAO J H, SUN J H, CHEN L Z, et al. Role of complementarity and select effect for yield advantage of maize/legumes intercropping systems[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(10): 2588-2596.