

播种方式与滴灌配置对晚播冬小麦光合与物质积累的影响

张君,张强斌,田文强,户美琳,连世昊,于姗,张金汕,石书兵

(新疆农业大学农学院,新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:为探明新疆北疆地区晚播冬小麦最适的播种方式与滴灌配置组合,以冬小麦品种新冬18号为材料,通过裂区试验,以播种方式(S)为主区,[S1(立体匀播,株距3.5 cm)、S2(宽窄行播:18-18-18-26 cm)、S3(宽窄行播:15-20-15-30 cm)和S4(常规条播,行距20 cm),每小区以连续的4行冬小麦(匀播为80 cm)为一组,中间两行为内行,其余为外行]以滴灌配置为副区[D1(二管四行,两管均距内行5 cm,匀播间30 cm+50 cm)、D2(二管四行,两管均距外行5 cm,匀播间距40 cm)、D3(等间距50 cm)、D4(一管四行,间距80 cm)],研究不同播种方式和滴灌配置组合对北疆地区晚播冬小麦净光合速率、物质积累、产量及构成因素的影响。结果表明,SPAD值和净光合速率均值在同一滴灌配置方式下均表现为S3>S2>S1>S4,同一播种方式下均表现为D1>D2>D3>D4,在S3D1处理下达到最高值;成熟期干物质积累和籽粒分配均在S2D1处理下达到最大值,S2D1处理的在花前干物质转运量和花后干物质同化量较S4D1处理分别增加30.20%和10.89%;S2D1处理的灌浆快增期和灌浆持续时间较S4D1处理分别延长1.6和2 d,灌浆平均速率提升11.34%,穗数、穗粒数和千粒重分别提高了11.93%、8.78%、8.30%,最终产量增加17.74%。通过灰色关联度综合评价,适合新疆北疆地区晚播冬小麦的播种方式与滴灌配置组合为S2(宽窄行播:18-18-18-26 cm)和D1二灌四行(距内行5 cm)。

关键词:晚播;播种方式;滴灌配置;光合;产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)09-1204-12

Effects of Sowing Patterns and Drip Irrigation Configuration on Photosynthesis and Dry Matter Accumulation of Late-Sown Winter Wheat

ZHANG Jun, ZHANG Qiangbin, TIAN Wenqiang, HU Meilin,

LIAN Shihao, YU Shan, ZHANG Jinshan, SHI Shubing

(College of Agronomy of Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: In order to figure out the most suitable combination of sowing pattern and drip irrigation configuration of late-sown wheat in northern Xinjiang, a winter wheat variety Xindong 18 was used as the test material, with the sowing method(S) as the main plot of a split-plot experiment, including S1 (three-dimensional uniform sowing), S2 (wide and narrow row sowing: 18-18-18-26 cm), S3 (wide and narrow row sowing: 15-20-15-30 cm), and S4 (conventional strip sowing, row spacing 20 cm), and each plot was grouped with continuous four rows of winter wheat (evenly sown within 80 cm). The drip irrigation configuration was set up as a sub-plot: two pipes and four rows (D1, both pipes were 5 cm away from the inner row, and the sowing interval was 30 cm + 50 cm), two pipes and four rows (D2, both pipes were 5 cm away from the outer row, and the spacing between the sowing was 40 cm), equal interval by 50 cm (D3), and one pipe and four rows (D4, interval spacing by 80 cm). The effects of different sowing patterns and drip irrigation combinations on the net photosynthetic rate,

收稿日期:2024-12-19 修回日期:2025-04-06

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发项目子课题(2021B02002-1-2)

第一作者 E-mail:1342719948@qq.com(张君)

通讯作者 E-mail:ssb@xjau.edu.cn(石书兵)

dry matter accumulation, yield and its components of the late-sown winter wheat in northern Xinjiang were studied. The results showed that the mean values of SPAD and net photosynthetic rate ranked as $S3 > S2 > S1 > S4$, and the mean values under the same sowing pattern ranked as $D1 > D2 > D3 > D4$, of which reached the peak under $S3D1$ treatment. The accumulation of dry matter and distribution of grains at maturity reached their maximum values under the $S2D1$ treatment. Compared to $S4D1$ treatment, the dry matter transportation before and after flowering increased by 30.20% and 10.89%, respectively; $S2D1$ treatment extended the rapid filling phase by 1.6 d, prolonged the duration of grain filling by 2 d, and increased the average grain filling rate by 11.34%, consequently improved the number of spikes, grain number per spike, and thousand-grain weight by 11.93%, 8.78%, and 8.30%, respectively, and ultimately resulted in an increase rate of 17.74% in yield. The comprehensive evaluation based on gray correlation concluded that the appropriate sowing pattern and drip irrigation configuration for late-sown winter wheat in the northern region of Xinjiang is $S2$ and $D1$.

Keywords: Late sowing; Sowing pattern; Drip irrigation configuration; Photosynthesis; Yield

小麦是中国第三大粮食作物,种植面积仅次于玉米、水稻^[1-3]。新疆是中国小麦的主要产区,但单位面积产量比中国平均水平低 $191.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。北疆地区冬小麦因前茬作物玉米收获时期较晚,致使冬小麦普遍晚播^[4-5]。与正常播期相比,晚播冬小麦的生育时期推迟,叶片数量、叶片面积及生长发育和产量均会受到很大的影响^[6-8]。晚播冬小麦积温不足,出现越冬前植株弱小或不苗等现象。而调整播种方式可以增加冬小麦干物质积累量,提高花前花后干物质向籽粒的转运量,改善冬小麦产量^[9]。北疆地区干旱少雨,通常采用滴灌技术提高水分利用效率。张娜等^[10]研究发现,小麦滴灌时肥料随水滴施,土壤中肥料随水转移,改变滴灌配置间接影响冬小麦生长发育。因此,找寻合理的播种方式和滴灌配置组合是提高北疆地区晚播冬小麦产量的关键。

目前在新疆地区常见的播种方式有条播、匀播、宽窄行播等,宽窄行播种在新疆作物栽培上应用广泛,在玉米、棉花等作物上均有高产记录^[11-12],所以宽窄行播种应用于小麦方面的研究值得探索。有研究表明,合理的播种方式比等行距条播更能发挥小麦边际效应,改变冬小麦地上部分的空间分布,改善小麦群体的通风透光情况,提高叶绿素含量、净光合速率,最终提高冬小麦干物质积累量^[13-15]。万刚等^[16]研究发现,冬小麦干物质分配及转运随着滴灌带间距的缩小而增加,也有研究认为,冬小麦产量随着滴灌带间距的逐步变大呈现出先增大后减小的现象。这说明适宜的播种方式和滴灌配置能提高小麦产量。

本试验在北疆塔城地区晚播条件下,探究不

同播种方式下滴灌带配置对冬小麦叶绿素含量、净光合速率、干物质积累及转运、灌浆速率、产量及其构成的影响,用灰色关联度分析进行综合评价,以明确晚播冬小麦最适合的播种方式以及滴灌配置,为新疆北部晚播冬小麦高产栽培技术提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023年10月—2024年8月年在新疆塔城地区农业科学研究所($82^{\circ}57'16''\text{E}$, $46^{\circ}43'13''\text{N}$)进行,试验地土壤类型为壤土,试验地前茬为玉米,试验前0~20 cm土壤基础养分有机质含量 $25.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH值 8.19,全氮含量 $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $17.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $145 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

本试验以塔城地区主要冬小麦品种新冬18号为试验材料,采用裂区设计。其中播种方式(S)为主区,设 $S1$ (立体匀播,株距 3.5 cm)、 $S2$ (宽窄行播:18-18-18-26 cm)、 $S3$ (宽窄行播:15-20-15-30 cm)和 $S4$ (常规条播,行距 20 cm)4种播种方式,每小区以连续的4行冬小麦(匀播为 80 cm)为一组,中间两行为内行,其余为外行;设滴灌配置为副区:设 $D1$ (二管四行,两管均距内行 5 cm,匀播间 30 cm + 50 cm)、 $D2$ (二管四行,两管均距外行 5 cm,匀播间距 40 cm)、 $D3$ (等间距 50 cm)和 $D4$ (一管四行间距 80 cm)4种滴灌配置。各处理均重复3次,共48个小区,小区面积 10.0 m^2 ($2.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$),试验地四周设3行保护行。

小麦于 10 月 15 日晚播, 播量为 8×10^6 粒 \cdot hm^{-2} , 播种深度为 4 cm 左右。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶绿素含量测定

于花后 5 d 开始, 在各小区选取长势一致的冬小麦 10 株(宽窄行分开取 5 株, 下同), 使用 SPAD-502 型叶绿素仪测定旗叶 SPAD 值, 每次旗

叶均匀测定 3 次, 取平均值。每隔 5 d 测定 1 次, 共测定 5 次。

1.3.2 净光合速率测定

于冬小麦灌浆期连续 3 d, 使用光合仪 TPS-2 于晴天 9:00—19:00, 每隔 2 h 测定一次冬小麦旗叶的净光合速率(P_n), 每个小区测定 5 片旗叶, 最后将 3 d 测定的数据平均记为灌浆期净光合速率指标。

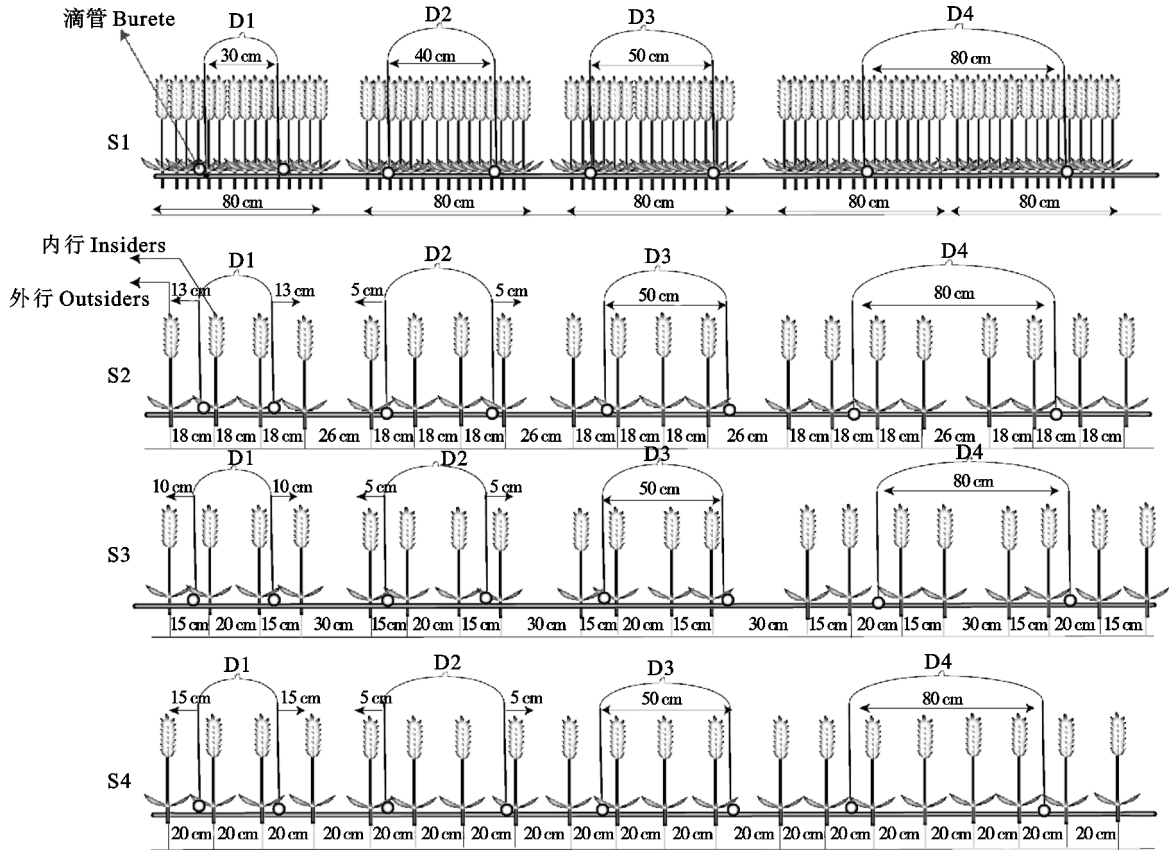


图 1 不同播种方式与滴灌配置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of different sowing patterns and drip irrigation configuration

1.3.3 干物质积累、转运与分配测定

于冬小麦的拔节期(JP)、孕穗期(BP)、抽穗期(HP)、开花期(FP)、灌浆期(GP)、成熟期(MP), 各小区抽取长势均匀的 10 株小麦鲜样, 用烘箱烘干至恒重后, 测定不同处理干物质质量变化趋势。于冬小麦成熟期称量籽粒+穗轴、茎、叶+叶鞘干重, 测定不同处理下冬小麦各器官占比。干物质转运参数计算方法:

花前干物质转运量 = 开花期干物质质量 - 成熟期营养器官干物质质量

花前干物质转运效率 = 花前干物质转运量 / 开花期干物质质量 $\times 100\%$

花前干物质对籽粒贡献率 = 花前干物质转运量 / 成熟期籽粒干重 $\times 100\%$

花后干物质同化量 = 成熟期籽粒干重 - 花前干物质转运量

花后干物质对籽粒贡献率 = 花后干物质同化量 / 成熟期籽粒干重 $\times 100\%$

1.3.4 籽粒灌浆参数测定

于小麦开花期后, 各小区选取长势均匀的主茎穗 100 株小麦进行标牌, 每隔 5 d 取 5 个小穗中部的 10 个籽粒, 放入烘箱下烘干至恒重, 称其干重, 换算为千粒重。根据 Logistic 模型拟合灌浆参数。

$$t = (4.59512 + \ln a) / (-b)$$

$$t_1 = [\ln a - \ln(2 + 1.732)] / (-b)$$

$$t_2 = [\ln a + \ln(2 + 1.732)] / (-b)$$

$$T_1 = t_2 - t_1$$

$$T_2 = t - t_2$$

$$T_{\max} = -a/b$$

$$V_{\max} = (k \times b) / 4$$

$$V_{\text{mean}} = k / t_3$$

以上公式, a 为初始灌浆势; b 为斜率参数; k 为理论籽粒最高粒重; t 为总灌浆天数; t_1 为快增期起始时间; t_2 为快增期结束时间; T_1 为快增期; T_2 为缓增期持续时间; T_{\max} 为最大灌浆速率出现时间; V_{\max} 为最大灌浆速率; V_{mean} 为平均灌浆速率。

1.3.5 产量及其构成因素测定

于成熟期每个小区内, 选取具有代表性、生长一致的 20 株小麦进行室内考种, 测量穗数、穗长、有效小穗数、穗粒数、穗粒重和千粒重, 并于各小区随机抽取 1 m² 进行测产。

1.3.6 综合评价

灰色关联分析是运用灰色系统理论的原理与方法, 通过因素之间发展趋势来衡量因素间关联程度的一种方法。具体步骤为: 1) 确定参考数列和因素数列; 2) 数据无量纲化处理; 3) 关联度计算; 4) 关联度排序。具体计算公式如下:

$$\zeta(K) = \frac{\min_i \min_k |x_0(K) - x_i(K)| + \rho \max_i \max_k |x_0(K) - x_i(K)|}{|x_0(K) - x_i(K)| + \rho \max_i \max_k |x_0(K) - x_i(K)|}$$

式中, x_0 为参考数列, x_i 为各指标数列, $\min_i \min_k |x_0(K) - x_i(K)|$ 和 $\max_i \max_k |x_0(K) -$

$x_i(K)|$ 分别为最小二阶差和最大二阶差; $|x_0(K) - x_i(K)|$ 为 K 时的绝对值; ρ 为分辨系数(一般为 0.5)。特征序列与因素序列之间的关联度

计算公式:
$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{K=1}^n \zeta_i(K)$$

式中, r_i 为等权关联度; n 表示处理数; $\zeta(K)$ 为关联系数。

1.4 数据分析

用 Excel 2021 进行数据处理, SPSS 27.0、DPS 软件进行统计分析, 使用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同播种方式与滴灌配置下冬小麦叶片叶绿素含量(SPAD 值)及净光合速率的变化

2.1.1 花后 SPAD 值

冬小麦叶片 SPAD 值随着花后天数的增加呈现先增大后减小的趋势(图 2), 各处理峰值均出现在花后 10 d, 各处理在开花 20 d 后 SPAD 值都出现急速下降。SPAD 均值在同一滴灌配置下表现为 S3>S2>S1>S4, 同一播种方式下表现为 D1>D2>D3>D4, 其中 S3D1 处理的 SPAD 值最大, 较其余分别提升了 2.36%(S1D2)、2.38%(S2D1)和 5.13%(S4D1)。这表明 S3D1 处理能提

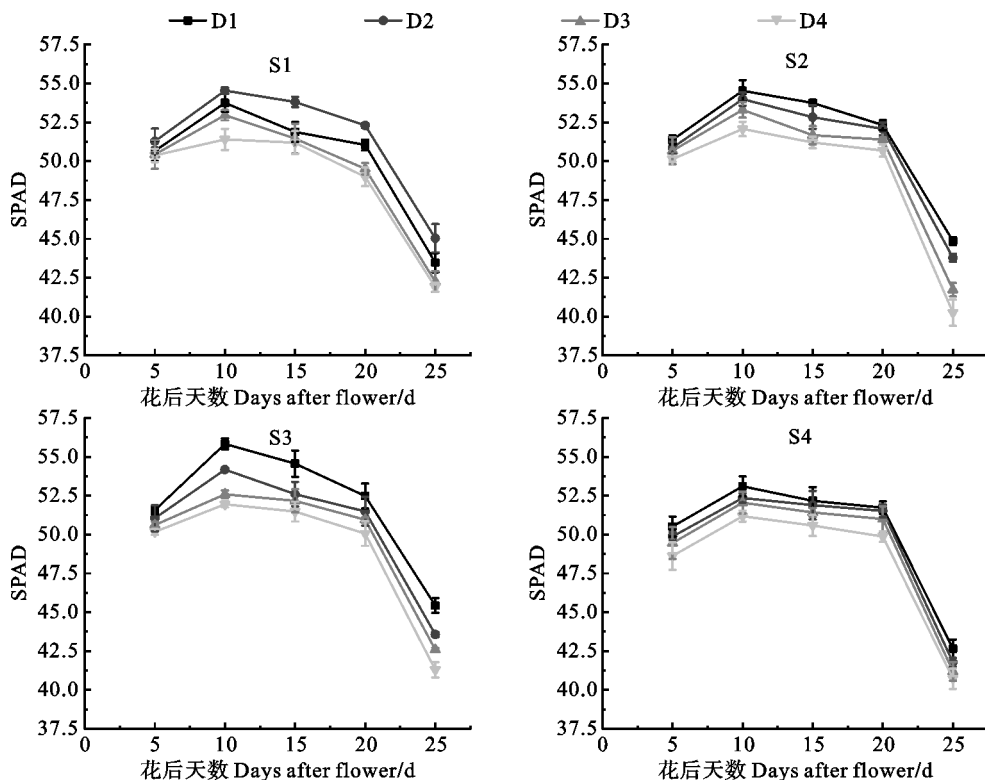


图 2 不同播种方式与滴灌配置下冬小麦叶片 SPAD 值

Fig. 2 SPAD values of winter wheat under different sowing patterns and drip irrigation configuration

高小麦花后叶片的 SPAD 值,使得冬小麦叶片保持较高的叶绿素含量。

2.1.2 净光合速率日变化

由图 3 可知,净光合速率在一天中呈现先增大后减小再增大最后持续减小的趋势,各处理均出现光合午休。相同时间段的 S1 下净光合速率始终表现为 D2>D1>D3>D4,而 S2、S3、S4 下则表现出 D1>D2>D3>D4;同一滴灌配置下,S1、S2、S3 在同一时间段的净光合速率均要高于 S4,S1D2、S2D1、S3D1 处理分别较 S4D1 处理提升 4.87%、9.67%和 10.71%。各处理均在中午 15:00 左右达到一天中净光合速率的最大值,表现最优的处理是 S3D1,S2D1 处理次之。

2.2 不同播种方式与滴灌配置下冬小麦干物质积累、转运及分配变化

2.2.1 干物质的动态变化

各处理干物质积累量的变化趋势均随着生育进程持续上升,并在开花-灌浆期积累速率达到最大(图 4)。同一滴灌配置下干物质积累量表现为 S2>S1>S3>S4,S2 干物质积累量较 S1、S3、S4

分别提高了 1.76%、3.42%、15.04%。在 S1 下,D2、D3、D4 干物质积累速率变化较为明显,D1 速率变化较为平缓,成熟期干物质积累量表现为 D2>D1>D3>D4;在 S2、S3、S4 下,干物质积累速率均以及成熟期干物质积累量均表现为 D1>D2>D3>D4,并以 S2D1 处理最大。

2.2.2 成熟期干物质分配

由图 5 可以看出,在 D1、D3、D4 下,籽粒+穗轴和茎+叶鞘的成熟期分配量均表现为 S2>S1>S3>S4,D2 下则是 S1 的分配量最大;S1、S2、S3 较 S4 分别提升了 32.62%、30.01%、27.03%和 40.38%、38.17%、36.26%。同一播种方式下,D1 和 D2 较 D3、D4 均显著提升了冬小麦成熟期的籽粒+穗轴和茎+叶鞘的分配量,但不同滴灌配置间成熟期叶片干重差异不明显,可能是因为取样时间较晚,叶片已出现枯萎发黄所导致;成熟期干物质总积累量和穗部重量以及茎+叶鞘均以 S2D1 处理最大,S1D2 处理次之,其次是 S3D1 处理,而 S4D4 处理的总积累量最低。这表明合理的播种方式与滴灌配置组合能有效提高冬小麦干物质向籽粒+穗轴部位的分配量。

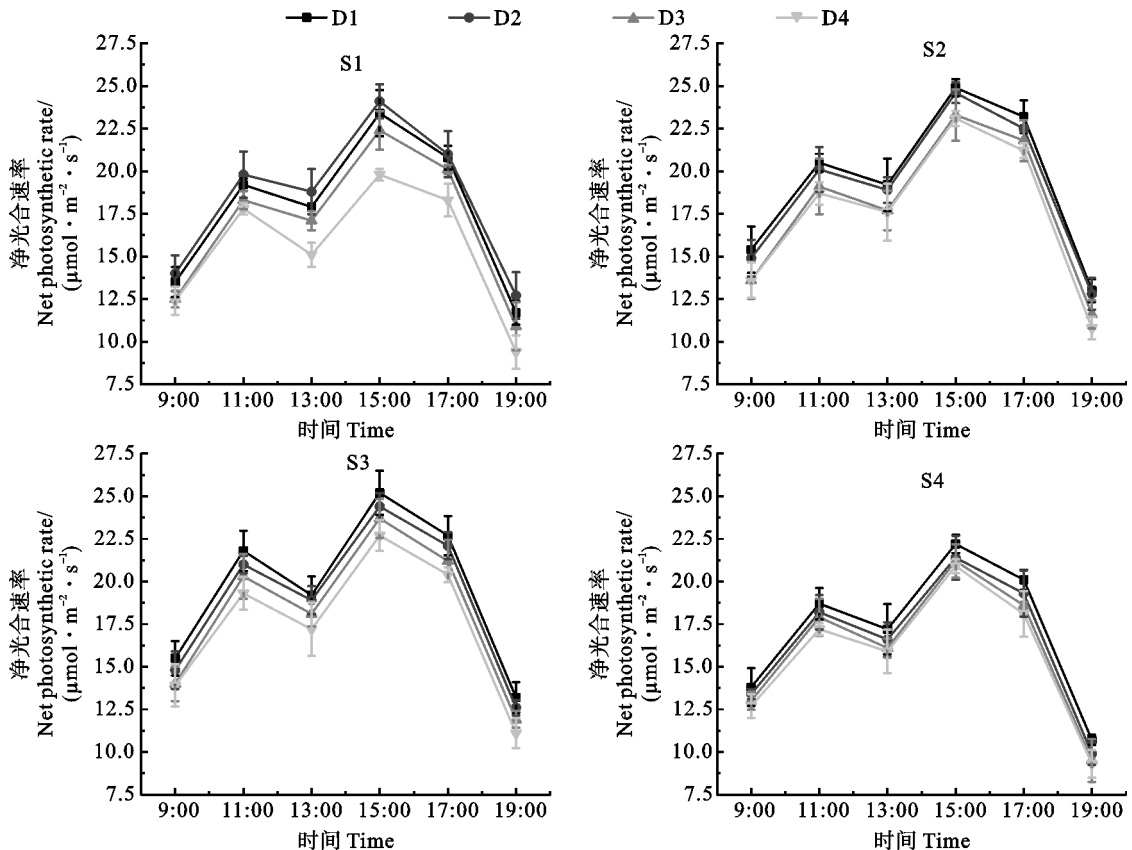


图 3 播种方式和滴灌配置对冬小麦净光合速率日变化的影响
Fig. 3 Effects of sowing patterns and drip irrigation configuration on winter wheat diurnal variation of net photosynthetic rate

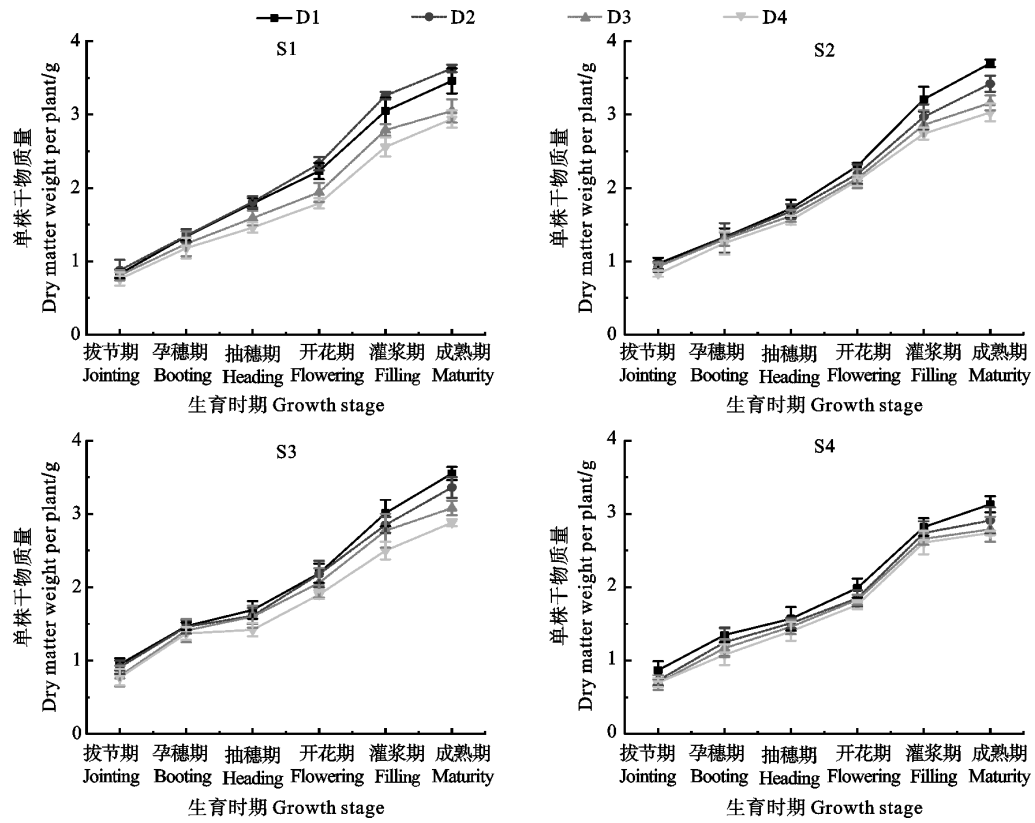
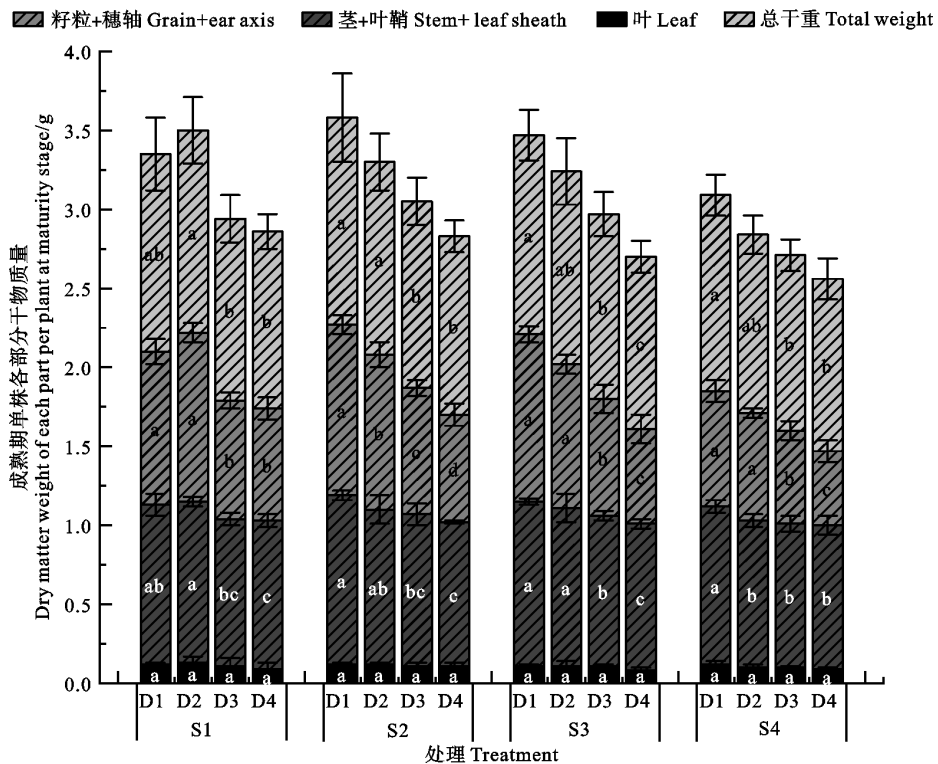


图 4 不同播种方式与滴灌配置下冬小麦干物质变化动态

Fig. 4 Dynamics of dry matter accumulation of winter wheat under different sowing patterns and drip irrigation configurations



同一播种方式下不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different letters under the same sowing pattern indicate significant differences among different drip irrigation configurations ($P < 0.05$).

图 5 不同播种方式与滴灌配置下成熟期干物质积累及分配

Fig. 5 Dry matter accumulation and distribution at maturity stage under different sowing patterns and drip irrigation configurations

2.2.3 干物质转运

不同播种方式对花前干物质转运和花后干物质同化的影响不同(表 1)。S1、S2、S3 在花前干物质转运和花后干物质同化较 S4 具有优势,说明 S1、S2、S3 均能促进开花前后同化物向籽粒的分配。其中 S2 花前干物质转运量大于其他播种方式,分别较 S1、S3、S4 提高了 6.47%、5.48%、30.20%,而 S2 下花后干物质同化量与 S1、S3 相差不大,较 S4 提升了 10.89%。同一播种方式下,D1 和 D2 较 D3 和 D4 更有利于花前花后同化物向籽粒中的分配,提高了籽粒干物质积累量,并以 S2D1 处理最高。

2.3 播种方式与滴灌配置对冬小麦籽粒灌浆的影响

2.3.1 籽粒灌浆拟合 logistic 模型

各模型的决定系数(R^2)介于 0.995 4 至 0.999 9 之间,均高于 0.995 0,说明不同处理条件下 Logistic 模型能够有效地描述小麦籽粒灌浆过

程。回归方程中参数 a 的生物学意义是反映灌浆起始时的生理状态, a 值越大表示灌浆启动越早; b 值为方程斜率,控制着平均速度, b 值越大则代表灌浆期间的平均速率越快; k 值是冬小麦能达到的理论千粒重, t 为花后灌浆天数。在 S1 下,理论千粒重呈现出 $D2 > D1 > D3 > D4$ 的变化趋势,而其他播种方式下均表现为 $D1 > D2 > D3 > D4$;相同滴灌配置下,理论千粒重均表现为 $S2 > S3 > S1 > S4$,于 S2D1 处理达到最高值,分别较 S1D1、S3D1 和 S4D1 处理提高了 8.62%、4.11%、19.33%。这说明匀播、宽窄行播较等行距条播均有利于小麦灌浆过程,其中 k 值(理想千粒重)在 S2(行距为 18-18-18-26 cm)下达到峰值,S3D1 处理比 S2D1 处理低,可能是因为 S3 下宽行行距 30 cm 过大,不利于滴灌模式下水肥的吸收,进而影响了灌浆过程。

表 1 不同播种方式与滴灌配置对干物质积累及转运的影响

Table 1 Effects of dry matter accumulation and transport on under different sowing patterns and drip irrigation configurations

处理 Treatment	花前干物质转运量 Dry matter transport amount before flowering/g	花前干物质转运率 Dry matter transport rate before flowering/%	花前干物质贡献率 Contribution rate of dry matter before flowering/%	花后干物质同化量 Dry matter accumulation amount after flowering/g	花后干物质贡献率 Contribution rate of dry matter after flowering/%
S1D1	0.98ab	43.99ab	44.33a	1.23a	55.67ab
S1D2	1.15a	47.31a	48.89a	1.20a	51.11b
S1D3	0.79bc	40.87ab	41.81a	1.11a	58.19a
S1D4	0.73c	40.95b	45.70a	0.87a	54.30ab
平均 Average	0.91	43.28	45.18	1.10	54.82
S2D1	0.99a	43.15a	41.57b	1.40a	58.43a
S2D2	0.97a	44.35a	44.18ab	1.23ab	55.82ab
S2D3	0.95a	44.57a	47.99ab	1.03bc	52.01ab
S2D4	0.93a	46.50a	54.24a	0.83c	45.76b
平均 Average	0.96	44.64	46.99	1.12	53.01
S3D1	0.97a	44.03ab	41.71b	1.35a	58.29a
S3D2	0.95a	43.44ab	44.45ab	1.18ab	55.55ab
S3D3	0.89ab	43.16b	46.61ab	1.02b	53.39bc
S3D4	0.89b	46.89a	52.73a	0.80b	47.27c
平均 Average	0.92	44.38	46.37	1.09	53.63
S4D1	0.83a	41.71a	42.26a	1.14a	57.74a
S4D2	0.75a	40.67a	41.73a	1.05a	58.27a
S4D3	0.73a	40.14a	43.14a	0.97a	56.86a
S4D4	0.67a	38.17a	43.18a	0.88a	56.82a
平均 Average	0.75	40.17	42.58	1.01	57.42

同列数值后不同字母表示同一播种方式下不同滴灌配置间在 0.05 水平上差异显著。表 4 同。

Different letters after the values within the same columns mean significant difference among different drip irrigation configurations under a same sowing patterns at 0.05 level. The same in table 4.

表 2 Logistic 方程的拟合及灌浆过程
Table 2 Fitting of logistic equations and grain-filling process

播种方式 Sowing pattern	滴灌配置 Drip irrigation configuration	回归方程 Equation	R^2	a	b	k
S1	D1	$y=51.9247/(1+e^{2.9874-0.201236t})$	0.9954	2.9874	-0.2012	51.9247
	D2	$y=53.6531/(1+e^{3.0670-0.199419t})$	0.9992	3.0670	-0.1994	53.6531
	D3	$y=48.3851/(1+e^{2.9875-0.214062t})$	0.9980	2.9875	-0.2141	48.4527
	D4	$y=47.4972/(1+e^{3.2439-0.223573t})$	0.9994	3.2439	-0.2236	47.4972
S2	D1	$y=58.2779/(1+e^{2.8004-0.196657t})$	0.9966	2.8004	-0.1967	57.8627
	D2	$y=57.1271/(1+e^{2.8502-0.200946t})$	0.9994	2.8502	-0.2009	56.3697
	D3	$y=52.3863/(1+e^{3.0925-0.203156t})$	0.9999	3.0925	-0.2032	53.1416
	D4	$y=50.3889/(1+e^{3.0254-0.205565t})$	0.9996	3.0254	-0.2056	50.3889
S3	D1	$y=55.9792/(1+e^{2.7562-0.198918t})$	0.9993	2.7562	-0.1989	56.8416
	D2	$y=53.9288/(1+e^{2.8892-0.199621t})$	0.9990	2.8892	-0.1996	55.1760
	D3	$y=51.8112/(1+e^{2.7666-0.205543t})$	0.9983	2.7666	-0.2055	51.8112
	D4	$y=49.7948/(1+e^{2.8006-0.210560t})$	0.9980	2.8006	-0.2106	49.7948
S4	D1	$y=48.8392/(1+e^{2.9950-0.211056t})$	0.9986	2.9950	-0.2111	48.8392
	D2	$y=46.2882/(1+e^{2.9328-0.226942t})$	0.9983	2.9328	-0.2269	46.2882
	D3	$y=44.1154/(1+e^{2.9095-0.213149t})$	0.9989	2.9095	-0.2131	44.1154
	D4	$y=42.6265/(1+e^{2.6897-0.212714t})$	0.9993	2.6897	-0.2127	42.6265

2.3.2 籽粒灌浆参数

由表 3 可知, S2 的最大速度 V_{\max} 、平均灌浆速率 V_{mean} 、快增期持续时间 T_1 、缓增期持续时间 T_2 以及总灌浆持续时间 t 的平均值高于 S1、S3 和 S4, 均在 S2D1 处理下达到峰值。S2D1 处理的灌浆快增期结束时间延后 1.6 d, 灌浆持续时间延长 2 d, 灌浆平均速率提升 11.34%。在 S2、S3、S4 下 V_{\max} 、 V_{mean} 、 T_1 、 T_2 、 t 均呈现 D1>D2>D3>D4 的规律, S1 下则 D2 的各参均达到峰值。在 S1 下出现了 D4>D1 这一现象, 可能是因为在实际种植过程中 S1D4 处理距出水口过近。条播的 T_{\max} 最小, 表示条播最大灌浆速率出现时间最早, 这可能是条播小麦籽粒灌浆中后期“动力不足”的原因。但不同播种方式下, D1、D2 较 D3、D4 更有利于小麦籽粒灌浆。

2.4 不同播种方式与滴灌配置下冬小麦产量的变化

D1、D2 的穗数、穗粒数、千粒重、产量较 D3 和 D4 均具有一定优势, 且 S1、S2 和 S3 较 S4 更有利于提高产量及产量构成因素。在 S2、S3 和 S4 下产量构成因素的均呈现规律为 D1>D2>D3>D4, 在 S1 下则是 D2 表现最优, 且各播种方式下 D1、D2 在产量及产量构成因素上与 D3

和 D4 均存在显著差异(表 4)。单位面积穗数在 S1D2 处理达到最大值, 较其他处理分别高出 1.14%~15.37%, 单株穗粒数和千粒重均在 S2D1 处理达到峰值, 分别较其他处理高出 1.57%~11.57%、1.68%~14.76%。

通过灰色关联度分析可以得知(表 5), 在本次试验中与参考序列关联程度最高的前 3 个处理表现为 S2D1>S3D1>S1D2, 通过比较各播种方式关联度平均值可以得出 S2>S3>S1>S4, 且各播种方式下 D1、D2 较 D3、D4 有明显优势。综合来看, S2D1 处理最符合理想序列, 较其他处理在冬小麦各项性状上均有一定的优势, 能够提高晚播冬小麦产量。

3 讨论

3.1 播种方式与滴灌配置对冬小麦光合、干物质积累、转运及分配的影响

冬小麦产量形成与光合作用密不可分, 改善播种方式能够优化群体空间分布, 提高光合特性, 延长绿叶时期, 增加群体干物质积累量, 进而提高产量^[17-18]。熊淑萍等^[19]研究表明, 适宜的行距能够充分发挥群体边际的优势, 提高小麦 SPAD 值,

表 3 播种方式和滴灌配置对冬小麦灌浆参数的影响

Table 3 Effects of sowing patterns and drip irrigation configuration on grain filling parameters of winter wheat

播种方式 Sowing pattern	滴灌配置 Drip irrigation configuration	t_1	t_2	t	T_1	T_2	V_{mean}	V_{max}	T_{max}
S1	D1	8.300 9	21.389 6	28.272 9	13.088 7	6.883 3	1.836 6	2.612 3	14.845 3
	D2	8.775 7	21.983 7	28.662 4	13.207 9	6.678 7	1.871 9	2.674 9	15.379 7
	D3	7.804 0	20.108 5	26.579 0	12.304 5	6.470 6	1.823 0	2.593 0	13.956 2
	D4	8.618 8	20.399 9	25.816 6	11.781 0	5.416 7	1.839 8	2.654 8	14.509 4
	平均 Average	8.374 9	20.970 4	27.332 7	12.595 5	6.362 3	1.842 8	2.633 8	14.672 7
S2	D1	7.543 3	20.936 7	28.602 5	13.393 5	7.665 8	2.023 0	2.844 8	14.240 0
	D2	7.630 1	20.737 7	28.079 7	13.107 6	7.342 0	2.007 5	2.831 8	14.183 9
	D3	8.739 8	21.704 8	28.175 9	12.965 0	6.471 1	1.886 1	2.699 0	15.222 3
	D4	8.311 0	21.124 0	27.739 0	12.813 1	6.615 0	1.816 5	2.589 5	14.717 5
	平均 Average	8.056 1	21.125 8	28.149 3	13.069 8	7.023 5	1.933 3	2.741 3	14.590 9
S3	D1	7.235 4	20.476 6	28.197 4	13.241 2	7.720 8	2.015 8	2.826 7	13.856 0
	D2	7.876 1	21.070 7	28.334 2	13.194 6	7.263 5	1.947 3	2.753 6	14.473 4
	D3	7.052 7	19.867 2	27.306 9	12.814 4	7.439 7	1.897 4	2.662 4	13.460 0
	D4	7.046 2	19.555 3	26.714 3	12.509 1	7.159 0	1.864 0	2.621 2	13.300 7
	平均 Average	7.302 6	20.242 5	27.638 2	12.939 8	7.395 8	1.931 1	2.716 0	13.772 5
S4	D1	7.950 7	20.430 4	26.969 4	12.479 7	6.539 1	1.810 9	2.577 0	14.190 5
	D2	7.120 1	18.726 2	24.989 1	11.606 1	6.262 9	1.852 3	2.626 2	12.923 1
	D3	7.471 5	19.828 7	26.568 7	12.357 2	6.740 1	1.660 4	2.350 8	13.650 1
	D4	6.453 5	18.835 9	26.253 8	12.382 4	7.417 9	1.623 6	2.266 8	12.644 7
	平均 Average	7.249 0	19.455 3	26.195 3	12.206 4	6.740 0	1.736 8	2.455 2	13.352 1

t_1 : 快增期起始时间; t_2 : 快增期结束时间; t : 灌浆持续时间; T_1 : 快增期; T_2 : 缓增期; T_{max} : 最大灌浆速率出现时间; V_{max} : 最大灌浆速率; V_{mean} : 平均灌浆速率。

t_1 : The origin of the rapid growth period; t_2 : The end of the rapid growth period; t : grain-filling stage; T_1 : Rapid growth period; T_2 : Slow growth phase; T_{max} : The time point when the maximum grain-filling rate occurs; V_{max} : Maximum grain-filling rate; V_{mean} : Average grain-filling rate.

表 4 播种方式与滴灌配置对冬小麦产量及构成因素的影响

Table 4 Effects of sowing patterns and drip irrigation configuration on yield and its components of winter wheat

播种方式 Sowing pattern	滴灌配置 Drip irrigation configuration	穗数 Spikes/ ($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
S1	D1	776.67a	37.90a	43.63b	8 608.05b
	D2	800.67a	38.80a	44.55a	8 846.50a
	D3	743.00b	37.13b	42.51c	8 120.84c
	D4	739.33b	36.50b	41.33d	7 789.55d
S2	D1	791.67a	40.70a	45.48a	9 069.47a
	D2	774.00a	39.13a	44.35ab	8 470.24a
	D3	749.67b	38.27b	42.64ab	8 470.24b
	D4	741.00b	37.52b	41.91b	7 925.01c
S3	D1	789.33a	40.07a	44.73a	8 954.59a
	D2	769.33ab	38.82ab	43.87ab	8 756.15 a
	D3	752.67bc	37.95bc	42.83ab	8 442.12b
	D4	736.00c	37.45c	41.75b	7 934.33c
S4	D1	754.33a	38.43a	43.09a	8 396.00a
	D2	749.67a	38.03a	42.30a	8 114.38a
	D3	715.33b	37.42b	40.71b	7 703.30b
	D4	694.00c	36.48b	39.63b	7 597.42b
F	S	51.665**	9.89**	11.52**	30.79**
	D	122.00**	21.66**	17.04**	60.36**
	S×D	2.93*	0.48	0.82	2.28*

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表 5 不同处理与冬小麦光合、物质积累以及产量的灰色关联度

Table 5 Grey correlation between different treatments and photosynthesis, material accumulation and yield of winter wheat

处理 Treatment	产量 Yield	穗数 Number of spikes	穗粒数 Number of grains per spike	千粒重 1 000-grain weight	干物质 Dry matter	总灌浆天数 Total grout days	净光合速率 Net photosynthetic rate	灰色关联度 Grey relevance
S1D1	0.61	0.73	0.54	0.67	0.67	0.86	0.53	0.64
S1D2	0.77	1.00	0.63	0.80	0.80	1.00	0.65	0.81
S1D3	0.44	0.53	0.48	0.55	0.55	0.53	0.42	0.47
S1D4	0.37	0.51	0.44	0.47	0.47	0.45	0.27	0.39
平均 Average	0.55	0.69	0.52	0.62	0.62	0.71	0.47	0.58
S2D1	1.00	0.88	1.00	1.00	1.00	0.98	0.87	0.96
S2D2	0.78	0.71	0.68	0.77	0.77	0.80	0.77	0.72
S2D3	0.55	0.56	0.58	0.57	0.57	0.83	0.51	0.56
S2D4	0.39	0.52	0.51	0.51	0.51	0.72	0.49	0.49
平均 Average	0.68	0.67	0.69	0.71	0.71	0.83	0.66	0.68
S3D1	0.87	0.85	0.84	0.83	0.83	0.83	1.00	0.84
S3D2	0.70	0.67	0.64	0.70	0.70	0.88	0.71	0.68
S3D3	0.54	0.58	0.55	0.58	0.58	0.63	0.57	0.54
S3D4	0.39	0.50	0.50	0.50	0.50	0.54	0.45	0.45
平均 Average	0.62	0.65	0.63	0.65	0.65	0.72	0.68	0.63
S4D1	0.52	0.58	0.56	0.61	0.61	0.58	0.41	0.51
S4D2	0.44	0.56	0.51	0.54	0.54	0.39	0.35	0.44
S4D3	0.35	0.43	0.45	0.44	0.44	0.53	0.34	0.40
S4D4	0.33	0.38	0.40	0.39	0.39	0.49	0.32	0.36
平均 Average	0.41	0.49	0.48	0.49	0.49	0.50	0.35	0.43

加快净光合速率,提高籽粒产量。杨相昆等^[20]研究发现,滴灌带间距对成熟期不同器官的干物质分配量有显著影响,干物质积累量随着滴灌带间距的扩大而减小。在本试验中,宽窄行播(S2)的SPAD值、净光合速率均高于匀播(S1)和等行距条播(S4),从而使小麦净光合速率提升9.67%,促进了群体干物质积累;且滴灌配置中,D1、D2的滴灌带分别靠近窄行,这可能更有利于水分在土壤中的分布,使得内行土壤水分含量升高,促进根系的生长及营养器官物质向生殖器官的转移,与前人^[20-23]研究结果一致。

3.2 播种方式与滴灌配置对籽粒灌浆及产量的影响

小麦籽粒灌浆特性是衡量灌浆过程的关键指标。研究表明,籽粒灌浆速率和灌浆持续时间决定着千粒重,且平均灌浆速度与千粒重呈极显著正相关^[23-24]。罗四维等^[25]认为,不同播种方式和滴灌配置对小麦灌浆速率影响不同。蒋桂英等^[26-27]发现,滴灌间距过大会导致小麦行内土壤水分吸收不及时,不利于冬小麦营养器官干物质向籽粒的转运,降低灌浆速率。本研究中,宽窄行

播和匀播提升了籽粒灌浆的平均速率、最大速率和持续时间,这可能是因为宽窄行播和匀播拥有更优的群体结构,使冬小麦群体空间中光和风得到更好地利用,延长籽粒中胚乳细胞的分裂时间,加快分裂速度,最终提高籽粒粒重;滴灌配置D3和D4在籽粒灌浆特性上表现较差,等间距的铺设方式致使毛管距内行较远,导致内行与外行的水肥分布不均匀,减缓灌浆速率,缩短灌浆持续时间,进而影响产量。

晚播冬小麦在生长后期基本没有分蘖,导致收获穗数和穗粒数较少,从而降低产量。穗数、穗粒数、千粒重均随着滴灌带间距变大而变小,改善播种方式和滴灌配置可以实现小麦高产^[25]。张双利等^[28]认为,宽行间距过大会导致产量减小,适宜的宽窄行间距能显著提高产量。本试验中,与S2相比,S3在产量及产量构成因素上的表现均较差,与前人研究一致,这可能是S3下宽行过宽,群体冠层连接不紧密,导致土表升温,水分蒸发加快,从而阻碍了产量的形成。在晚播条件下,播量多于常规播种,本试验中宽窄行播(18-18-18-26 cm)的穗粒数和千粒重表现较好,但其单位面

积穗数低于匀播,这可能是由于匀播条件下孕穗后出现群体拥挤,小麦单株开始竞争生存空间,致使各项指标的综合评价差于宽窄行播(18-18-18-26 cm)的原因。因此未来可结合播期适当减少播量,以进一步探究播种方式与滴管配置的组合对冬小麦产量的影响。

4 结论

晚播条件下,与 S4 相比,S1 和 S2、S3 均能提高冬小麦 SPAD 值、净光合速率,提升干物质积累量、花前花后干物质向籽粒的转移分配;在同一播种方式下,不同的滴灌配置对干物质积累、灌浆参数、产量及构成要素的影响均不同,S1 下 $D2 > D1 > D3 > D4$,其他播种方式下均表现为 $D1 > D2 > D3 > D4$ 。通过灰色关联度综合分析,S2D1 处理表现最优。因此,在晚播条件下,宽窄行 S2 (18-18-18-26 cm)和滴灌配置 D1 的栽培组合将有助于促进北疆地区冬小麦光合、干物质积累、灌浆速率和产量形成。

参考文献:

- [1] YANG C J, LADEJOBI O, MOTT R, *et al.* Analysis of historical selection in winter wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2022, 135(9): 3005.
- [2] 刘阿康, 栗丽, 常旭虹, 等. 冬小麦秋播及冬前管理关键技术 [J]. 作物杂志, 2024(6): 254.
LIU A K, LI L, CHANG X H, *et al.* Key technology for autumn sowing and pre-winter management of winter wheat [J]. *Crops*, 2024(6): 254.
- [3] SUN S, YANG X, LIN X, *et al.* Winter wheat yield gaps and patterns in China [J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(1): 319.
- [4] 赖宇, 耿庆龙, 李永福, 等. 有机无机配施对超晚播冬小麦产量、氮磷养分吸收利用及土壤肥力的影响 [J]. 新疆农业科学, 2023, 60(6): 1335.
LAI Y, GENG Q L, LI Y F, *et al.* Effects of organic manure application combined with chemical fertilizer on yield, nitrogen, phosphorus uptake and utilization, and soil fertility of the extremely-late winter sown wheat [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(6): 1335.
- [5] 尹志刚, 石守设, 朱保磊, 等. 豫南稻麦轮作区晚播小麦的群体特征及产量表现 [J]. 浙江农业科学, 2023, 64(1): 104.
YIN Z G, SHI S S, ZHU B L, *et al.* Population characteristics and yield performance of late-sown wheat in rice-wheat rotation area in southern Henan [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2023, 64(1): 104.
- [6] 赵莉, 何贤芳, 都斌斌, 等. 播期和品种对沿淮晚播稻茬小麦产量和产值的影响 [J]. 麦类作物学报, 2021, 41(5): 613.
ZHAO L, HE X F, DU B B, *et al.* Effects of sowing date and variety on yield and output value of late-sown wheat after rice in the region along Huaihe River [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(5): 613.
- [7] 王晨阳, 冯辉, 张玉红, 等. 播期对不同穗型冬小麦旗叶光合特性及产量的影响 [J]. 河南农业科学, 2009, 38(7): 35.
WANG C Y, FENG H, ZHANG Y H, *et al.* Effect of sowing date on photosynthetic characteristics of flag leaf and grain yield in winter wheat cultivars with different ear-types [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2009, 38(7): 35.
- [8] 杨胜利, 马玉霞, 冯荣成, 等. 豫北地区两类强筋小麦最佳播期及晚播极限研究 [J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2008, 36(3): 9.
YANG S L, MA Y X, FENG R C, *et al.* Studies on the most appropriate sowing date and the latest sowing date of two types strong gluten wheat in north Henan [J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2008, 36(3): 9.
- [9] TWIZERIMANA A, NIYIGABA E, MUGENZII, *et al.* The combined effect of different sowing methods and seed rate on the quality features and yield of winter wheat [J]. *Agriculture*, 2020, 10(5): 153.
- [10] 张娜, 张永强, 唐江华, 等. 滴灌带配置方式对冬小麦生长及产量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2013, 33(6): 1197.
ZHANG N, ZHANG Y Q, TANG J H, *et al.* Effect of drip irrigation layout on growth and yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(6): 1197.
- [11] 王崇桃, 李少昆, 陈永生. 奇台总场玉米生产技术特征与效益分析 [J]. 玉米科学, 2019, 27(2): 170.
WANG C T, LI S K, CHEN Y S. Technical characteristics and benefit analysis of maize production in Qitai farm [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(2): 170.
- [12] 姜善伟, 董合忠, 田晓莉, 等. 新疆棉花“矮、密、早”栽培历史、现状和展望 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(4): 720.
LOU S W, DONG H Z, TIAN X L, *et al.* The “short, dense and early” cultivation of cotton in Xinjiang: History, current situation and prospect [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(4): 720.
- [13] 刘林业, 王壮壮, 谷丰序, 等. 播种方式对冬小麦群体光合特性、氮素积累转运及产量的影响 [J]. 河南农业科学, 2024, 53(10): 28.
LIU L Y, WANG Z Z, GU F X, *et al.* Effects of seeding methods on population photosynthetic characteristics, nitrogen accumulation and transport and yield of winter wheat [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2024, 53(10): 28.
- [14] 刘岩, 周勋波, 陈雨海, 等. 种植方式和灌溉对冬小麦叶绿素荧光参数及产量的影响 [J]. 作物杂志, 2011(1): 38.
LIU Y, ZHOU X B, CHEN Y H, *et al.* Effects of planting patterns and irrigation on chlorophyll fluorescence and yield in winter wheat [J]. *Crops*, 2011(1): 38.
- [15] 张金汕, 贾永红, 孙鹏, 等. 匀播和施氮量对冬小麦群体、光合及干物质积累的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 12.

- ZHANG J S, JIA Y H, SUN P, *et al.* Effect of uniform pattern and N application rate on colony, photosynthesis and dry matter accumulation of winter wheat [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(7): 12.
- [16] 万刚. 滴灌带不同配置方式对小麦生长发育及产量的影响[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(17): 81.
- WAN G. Effects of different configurations of drip irrigation belt on wheat growth and yield [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2010, 16(17): 81.
- [17] 李欣欣, 石祖梁, 王久臣, 等. 施氮量和种植密度对稻茬晚播小麦干物质积累及光合特性的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(5): 140.
- LI X X, SHI Z L, WANG J C, *et al.* Effects of nitrogen application amount and planting density on dry matter accumulation and flag leaf photosynthetic characteristics for late-sowing wheat in rice-wheat rotation [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(5): 140.
- [18] 马尚宇, 王艳艳, 刘雅男, 等. 播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(3): 375.
- MA S Y, WANG Y Y, LIU Y N, *et al.* Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3): 375.
- [19] 熊淑萍, 曹文博, 张志勇, 等. 行距和播种量对冬小麦冠层光合有效辐射垂直分布、生物量和籽粒产量的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1298.
- XIONG S P, CAO W B, ZHANG Z Y, *et al.* Effects of row spacing and sowing rate on vertical distribution of photosynthetically active radiation, biomass, and grain yield in winter wheat canopy [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1298.
- [20] 杨相昆, 魏建军, 张占琴, 等. 不同滴管带配置对冬小麦干物质动态变化的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(7): 72.
- YANG X K, WEI J J, ZHANG Z Q, *et al.* Dynamic change of dry matter accumulation and distribution of winter wheat under different distance to drip tape [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2012, 21(7): 72.
- [21] 王晨, 唐江华, 徐文修, 等. 宽窄行播种对滴灌冬小麦干物质积累及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(10): 1287.
- WANG C, TANG J H, XU W X, *et al.* Effect of row width on dry matter accumulation and yield of winter wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(10): 1287.
- [22] 王玉杰, 王永华, 韩磊, 等. 不同栽培管理模式对冬小麦花后干物质积累与分配特征及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(5): 894.
- WANG Y J, WANG Y H, HAN L, *et al.* Effect of different cultivation and management mode on the characteristics of accumulation and distribution of dry matter and the yield of winter wheat after anthesis [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(5): 894.
- [23] 刘冲, 贾永红, 张金汕, 等. 施磷量对不同播种方式下冬小麦干物质转运及养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 975.
- LIU C, JIA Y H, ZHANG J S, *et al.* Effects phosphorus application rates on dry matter translocation and nutrient uptake and utilization of winter wheat under different seeding patterns [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(5): 975.
- [24] 张胜全, 方保停, 张英华, 等. 冬小麦节水栽培三种灌溉模式的水氮利用与产量形成[J]. 作物学报, 2009, 35(11): 2045.
- ZHANG S Q, FANG B T, ZHANG Y H, *et al.* Utilization of water and nitrogen and yield formation under three limited irrigation schedules in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(11): 2045.
- [25] 罗四维, 石秀楠, 贾永红, 等. 滴灌的毛管间距和滴头间距对匀播冬小麦光合、干物质积累和产量形成的影响[J]. 作物杂志, 2023(3): 230.
- LUO S W, SHI X N, JIA Y H, *et al.* Effects of drip irrigation capillary spacing and drop spacing on photosynthesis, dry matter accumulation, and yield formation of uniformly sown winter wheat [J]. *Crops*, 2023(3): 230.
- [26] 蒋桂英, 魏建军, 刘萍, 等. 滴灌春小麦生长发育与水分利用效率的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 50.
- JIANG G Y, WEI J J, LIU P, *et al.* Spring wheat growth and water use efficiency under drip irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(6): 50.
- [27] 卢伟鹏, 张龙龙, 杨建平, 等. 不同滴灌带配置对春小麦产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(2): 237.
- LU W P, ZHANG L L, YANG J P, *et al.* Effects of different drip irrigation belt configurations on spring wheat yield [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(2): 237.
- [28] 张双利, 王晨阳, 郭天财, 等. 行距配置对高产冬小麦群体质量及产量的影响[J]. 河南科学, 2010, 28(6): 689.
- ZHANG S L, WANG C Y, GUO T C, *et al.* Effects of row spacing patterns on population quality and grain yield of high-yielding winter wheat [J]. *Henan Science*, 2010, 28(6): 689.