

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.31042

不同播幅对小麦花后叶片光合特性和产量的影响

张 振¹ 赵俊晔^{2,*} 石 玉¹ 张永丽¹ 于振文¹

¹ 山东农业大学农学院 / 小麦育种全国重点实验室 / 农业农村部作物生理生态与耕作重点实验室, 山东泰安 271018; ² 中国农业科学院农业信息研究所 / 农业部农业信息服务技术重点实验室, 北京 100081

摘 要: 为了明确不同播幅对小麦籽粒产量的影响及其形成的生理原因, 本研究于 2019—2020 年和 2020—2021 年冬小麦生长季, 在山东省济宁市兖州区小孟镇史家王子村小麦试验站大田试验条件下设置 2 种播幅处理: 处理 1 是播幅为 8 cm (B1); 处理 2 是播幅为 3 cm (B2)。研究了不同播幅对小麦光合特性、冠层光截获特性、干物质积累与转运和籽粒产量的影响。试验结果表明: B1 处理开花后叶面积指数和冠层光合有效辐射截获率显著高于 B2 处理, 其冠层光合有效辐射透射率显著低于 B2 处理; B1 处理开花后旗叶叶绿素相对含量、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均显著高于 B2 处理, 其胞间二氧化碳浓度显著低于 B2 处理; B1 处理开花期和成熟期干物质积累量、开花后干物质在籽粒中的分配量、成熟期籽粒干物质积累量均显著高于 B2 处理; B1 处理穗粒数、千粒重均显著高于 B2 处理; 与 B2 处理相比, B1 处理的 2 年平均籽粒产量和光能利用率分别高 6.12% 和 7.71%。综上所述, 播幅为 8 cm 的 B1 处理通过塑造了合理的冠层结构, 改善了开花后叶片的光合性能, 有利于开花后植株的光合物质生产, 从而获得了最高的籽粒产量和光能利用率, 为本试验条件下的最优处理。研究为小麦宽幅播种节水高产高效栽培技术提供了理论依据。

关键词: 小麦; 光合特性; 干物质积累与转运; 籽粒产量

Effects of different sowing space on photosynthetic characteristics after anthesis and grain yield of wheat

ZHANG Zhen¹, ZHAO Jun-Ye^{2,*}, SHI Yu¹, ZHANG Yong-Li¹, and YU Zhen-Wen¹

¹ College of Agronomy, Shandong Agricultural University / National Key Laboratory of Wheat Breeding / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tai'an 271018, Shandong, China; ² Key Laboratory of Agricultural Information Service Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: In order to clarify the influence of different sowing width on wheat grain yield and its physiological causes, in the 2019–2020 and 2020–2021 winter wheat growing seasons, two sowing treatments were set under field test conditions at Shijia-wangzi Wheat Test Station, Xiaomeng Town, Yanzhou District, Jining City, Shandong Province. Treatment 1 was 8 cm (B1); Treatment 2 is broadcast at 3 cm (B2). The effects of different sowing plots on photosynthetic characteristics, canopy light interception characteristics, dry matter accumulation and transport, and grain yield of wheat were studied. The results showed that the leaf area index and photosynthetically active radiation interception rate of B1 treatment were significantly higher than those of B2 treatment, and the photosynthetically active radiation transmittance of B1 treatment was significantly lower than that of B2 treatment. The relative chlorophyll content, net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of flag leaves under B1 treatment were significantly higher than B2 treatment, and the intercellular carbon dioxide concentration was significantly lower than B2 treatment. Dry matter accumulation at anthesis and maturity, dry matter distribution in seeds after anthesis and dry

本研究由国家自然科学基金项目(32172114, 31601243), 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03)和泰山学者工程专项经费资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (32172114, 31601243), the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-03), and the Special funds for Taishan Scholars Project.

* 通信作者(Corresponding author): 赵俊晔, E-mail: zhaojunye@caas.cn

第一作者联系方式: E-mail: zhangzhenxiaomai@163.com

Received (收稿日期): 2023-02-16; Accepted (接受日期): 2023-04-17; Published online (网络出版日期): 2023-11-13.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20231110.0916.006>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

matter accumulation at maturity were significantly higher under B1 treatment than B2 treatment. The number of grains per spike and 1000-grain weight of B1 treatment were significantly higher than those of B2 treatment. Compared with B2 treatment, the two-year average grain yield and light energy utilization rate of B1 treatment increased by 6.12% and 7.71%, respectively. In summary, B1 treatment with a sowing width of 8 cm can shape a reasonable canopy structure, improve the photosynthetic performance of leaves after anthesis, and facilitate the production of photosynthetic substances of plants after anthesis, thus obtaining the highest grain yield and light energy utilization rate, which is the optimal treatment under the conditions of this experiment. This research provides a theoretical basis for wide-sowing technology of wheat with water-saving, high-yield and high-efficiency.

Keywords: wheat; photosynthetic characteristics; dry matter accumulation and transport; grain yield

山东省作为我国小麦主产省份之一,其小麦种植面积约为全国总种植面积的 20%^[1]。传统播幅过窄导致小麦种子分布拥挤,个体间竞争加剧,不利于小麦个体生长发育;合理的播幅能够有效增加个体的生长优势和优化冠层结构,从而更有效利用土壤、光照、水分等资源,进而提高籽粒产量^[2]。因此,研究不同播幅对小麦籽粒产量的影响及其形成的生理机制,对山东省小麦生产具有重要意义。

籽粒产量的 70%~80%来源于开花后叶片光合作用产生的同化物,合理的群体结构能够促进叶片的光合作用,增加光合产物的积累和转运。前人研究表明,行距和基本苗密度等栽培管理措施均对小麦群体结构有显著影响,行距 25 cm 处理的开花后旗叶净光合速率和叶面积指数比行距 20 cm、30 cm 处理分别高 7.45%、6.99%和 5.85%、5.64%,适宜行距显著改善群体结构,提高叶片光合能力,最终实现增产^[3]。亦有研究表明,行距 16 cm 处理灌浆期叶面积指数比行距 11 cm 处理高 12.4%^[4]。Zhao 等^[5]研究表明,小麦叶面积指数与冠层光合有效辐射截获率呈显著正相关($r = 0.971^*$)。行距 30 cm 处理的冠层光合有效辐射截获率比行距 25 cm、18 cm 处理分别低 16.8%、20.9%,增大行距导致群体漏光损失严重^[6]。行距为 12 cm 处理的籽粒产量比行距为 7 cm 和 17 cm 处理分别高 12.61%和 7.29%^[5]。另有研究表明,基本苗密度为 225 万株 hm^{-2} 处理的籽粒产量比基本苗密度为 150 万株 hm^{-2} 和 300 万株 hm^{-2} 处理分别高 80.62%和 27.34%^[7]。李拴良等^[8]研究表明,播幅为 10 cm 处理的穗粒数、千粒重和籽粒产量比播幅为 5 cm 处理分别高 10.69%、13.89%和 12.56%。前人关于行距和基本苗密度对小麦冠层光截获和籽粒产量形成进行了较多研究,但关于播幅对小麦产量的形成机理尚欠深入研究。因此,本研究通过分析 2 种播幅条件下小麦光合特性、冠层光截获特性、干物质积累与转运和籽粒产量的差异,明确播幅对小麦产量的影响及其形成的生理机制,以期小麦宽幅播种节水高产栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2019—2020 年和 2020—2021 年冬小麦生长季在山东省济宁市兖州区小孟镇史家王子村小麦试验站进行,小麦两个生长季降水量分别为 163.0 mm 和 202.5 mm,小麦两个生长季的平均气温分别为 25℃、23.2℃。试验地土壤类型为壤土,前茬作物为玉米,玉米收获后秸秆全部还田,2019—2020 生长季播种前 0~20 cm 土层的土壤特性为:有机质 14.20 g kg^{-1} ,全氮 1.13 g kg^{-1} ,碱解氮 122.60 mg kg^{-1} ,速效钾 129.44 mg kg^{-1} ,速效磷 38.11 mg kg^{-1} ;2020—2021 生长季播种前 0~20 cm 土层的土壤特性为:有机质 14.34 g kg^{-1} ,全氮 1.15 g kg^{-1} ,碱解氮 124.11 mg kg^{-1} ,速效钾 132.85 mg kg^{-1} ,速效磷 39.74 mg kg^{-1} 。

1.2 试验设计

以济麦 22 作为供试小麦品种,采用随机区组试验设计,设置 2 种播幅处理:处理 1 是播幅为 8 cm (B1),处理 2 是播幅为 3 cm (B2),播幅 8 cm 是由宽幅播种机播种,播幅 3 cm 是由常规播种机播种。两播幅处理灌溉和施肥管理相同,灌溉管理为于小麦拔节期和开花期将 0~40 cm 土层土壤相对含水量均补灌至 75%,灌水量按如下公式^[9]计算: $M = 10 \times r \times H \times (\beta_i - \beta_j)$,式中, M 为灌水量(mm), H 是灌溉土层深度(cm), r 是土壤容重(g cm^{-3}), β_i 是目标土壤含水量(%), β_j 是灌溉前土壤含水量(%)。采用微喷带灌溉并用水表计量。播幅为 8 cm 处理 2 个生长季灌水量分别为 115.28 mm、81.40 mm,播幅为 3 cm 处理 2 个生长季灌水量分别为 148.90 mm、107.25 mm。施肥管理为播种前底施纯氮 105 kg hm^{-2} 、 P_2O_5 150 kg hm^{-2} 和 K_2O 150 kg hm^{-2} ,拔节期开沟追施纯氮 135 kg hm^{-2} ,氮、磷、钾肥分别选用尿素(46% N)、磷酸二铵(18% N 和 46% P_2O_5)和硫酸钾(50% K_2O)。

试验小区长 20 m,宽 2 m,3 次重复,小区内种植 8 行小麦,在第 4 行和第 5 行之间放置微喷带。

各小区之间设置 2 m 保护行, 减少相邻地块间的影响。田间试验分别于 2019 年 10 月 12 日和 2020 年 10 月 8 日播种, 两处理播幅+行距均是 25 cm, 2019 年和 2020 年播种密度分别为 240 万株 hm^{-2} 和 180 万株 hm^{-2} , 于 2020 年 6 月 11 日和 2021 年 6 月 13 日收获。其他病虫害等田间管理措施同一般高产田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合作用二氧化碳气体交换测定 采用便携式光合系统(LI-6400, LI-COR, 美国)分别于开花 0 d 和开花后 7、14、21、28 d 上午 09:00—11:00, 测定各处理旗叶光合参数, 包括净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度^[10]。

1.3.2 相对叶绿素含量的测定 采用便携式叶绿素仪(SPAD-502, Minolta Camera Co., 日本)分别于开花 0 d 和开花后 7、14、21、28 d 上午 09:00—11:00, 测定各处理旗叶叶绿素相对含量。

1.3.3 叶面积指数和冠层光合有效辐射测定 采用作物冠层分析仪(SunScan, Delta, 英国)分别于开花 0 d 和开花后 7、14、21、28 d 上午 09:00—11:00, 测定各处理植株冠层叶面积指数(LAI)和冠层光合有效辐射, 小麦冠层光合有效辐射截获率(C)、截获量(I)和透射率(P)计算公式如下所示^[11]。

$$C(\%) = (P_n - P_{n-1}) / PT \times 100$$

$$I(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}) = R \times C \times 0.5$$

$$P(\%) = P_{n-1} / P_n \times 100$$

式中, P_n 表示植株上方距离 50 cm 处光合有效辐射, P_{n-1} 表示近地面处光合有效辐射, PT 表示自然光照下光合有效辐射, R 表示顶部光合有效辐射总量, 数据来源于试验站气象观测站。

1.3.4 干物质测定 于小麦开花期和成熟期采集 20 个小麦植株单茎, 开花期小麦植株按照茎秆+叶鞘、穗和叶片分为 3 个部分, 成熟期小麦植株按照茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳、籽粒和叶片分为 4 个部分, 样品 105℃杀青 30 min, 70℃烘干至恒重, 测定干物质重^[12]。

计算公式如下^[13]:

开花前营养器官贮藏同化物转运量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 开花期干物质质量 - 成熟期营养器官干物质质量

开花前营养器官贮藏同化物对籽粒贡献率(%) = 开花期营养器官贮藏同化物转运量/成熟期籽粒干重 $\times 100$

开花后干物质在籽粒中的分配量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 成熟期籽粒干重 - 开花前营养器官贮藏同化物转运量

开花后干物质对籽粒贡献率(%) = 开花后干物

质在籽粒中的分配量/成熟期籽粒干重 $\times 100\%$

1.3.5 光能转化率和光能利用率测定 按照以下公式计算^[14]:

光能转化率(PCE, $\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$) = (成熟期干物质质量 - 开花期干物质质量)/

光能利用率(PUE, $\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$) = $I/R \times \text{PCE}$

式中, I 表示截获量, R 表示顶部光合有效辐射总量。

1.3.6 籽粒产量及构成因素 于小麦成熟期收获 3 m^2 的小麦风干至含水量为 12.5%时脱粒测定籽粒产量和千粒重, 调查 3 m^2 内的穗数以计算公顷穗数, 选取长势一致的 20 个麦穗测定穗粒数^[15]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素(one-way ANOVA)和 LSD 法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$), 利用 SigmaPlot 12.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 开花后叶面积指数

如图 1 所示, 2019—2020 生长季, 开花 0 d 和开花后 7、14、21、28 d 叶面积指数均为 B1 处理显著高于 B2 处理, B1 处理开花后叶面积指数均值比 B2 处理高 8.42%。2020—2021 生长季各处理开花后叶面积指数均与 2019—2020 生长季试验结果变化趋势一致。结果表明, B1 处理有利于塑造合理的群体结构, 有利于植株冠层对光合有效辐射的截获利用。

2.2 开花后冠层光合有效辐射截获率和透射率

如图 2 所示, 2019—2020 生长季, 开花 0 d 和开花后 7、14、21、28 d 冠层光合有效辐射截获率均为 B1 处理显著高于 B2 处理, B1 处理开花后冠层光合有效辐射截获率均值比 B2 处理高 7.59%; 开花 0 d 和开花后 7、14、21、28 d 冠层光合有效辐射透射率均为 B1 处理显著低于 B2 处理, B1 处理开花后冠层光合有效辐射截获率均值比 B2 处理低 33.76%。2020—2021 生长季各处理开花后冠层光合有效辐射截获率和透射率均与 2019—2020 生长季试验结果变化趋势一致。结果表明, B1 处理提高了冠层对光合有效辐射的截获利用, 有利于减少漏光损失。

2.3 开花后旗叶叶绿素相对含量

如图 3 所示, 2019—2020 生长季, 开花 0 d 和开花后 7、14、21、28 d 旗叶叶绿素相对含量均为 B1 处理显著高于 B2 处理, B1 处理开花后旗叶叶绿素相对含量均值比 B2 处理高 14.56%。2020—2021 生长

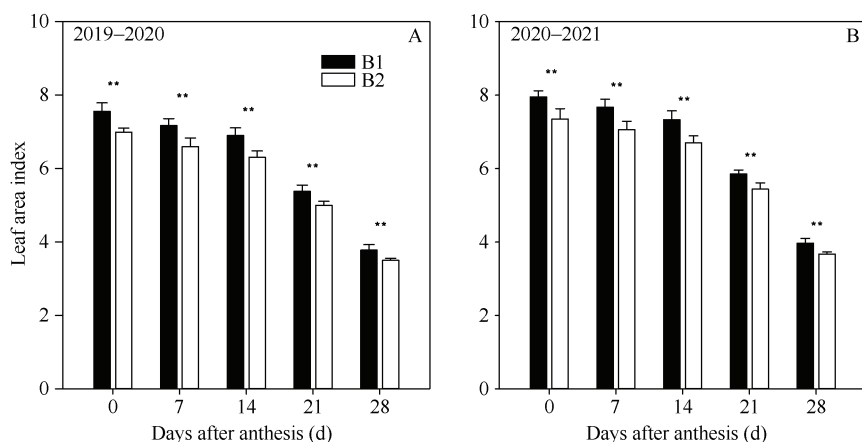


图 1 不同处理开花后叶面积指数

Fig. 1 Leaf area index after anthesis under different treatments

B1: 播幅为 8 cm; B2: 播幅为 3 cm。A、B 分别表示 2019–2020 和 2020–2021 生长季开花后叶面积指数。图中所示数据均为每处理测定的 3 次重复, **表示不同处理在 0.01 概率水平差异显著。

B1: the broadcast width is 8 cm; B2: the broadcast width is 3 cm. A and B represent the leaf area index after anthesis in the 2019–2020 and 2020–2021 growing seasons, respectively. The data shown in the figure are all three replicates of each treatment. ** indicate significant differences between different treatments at the 0.01 probability level.

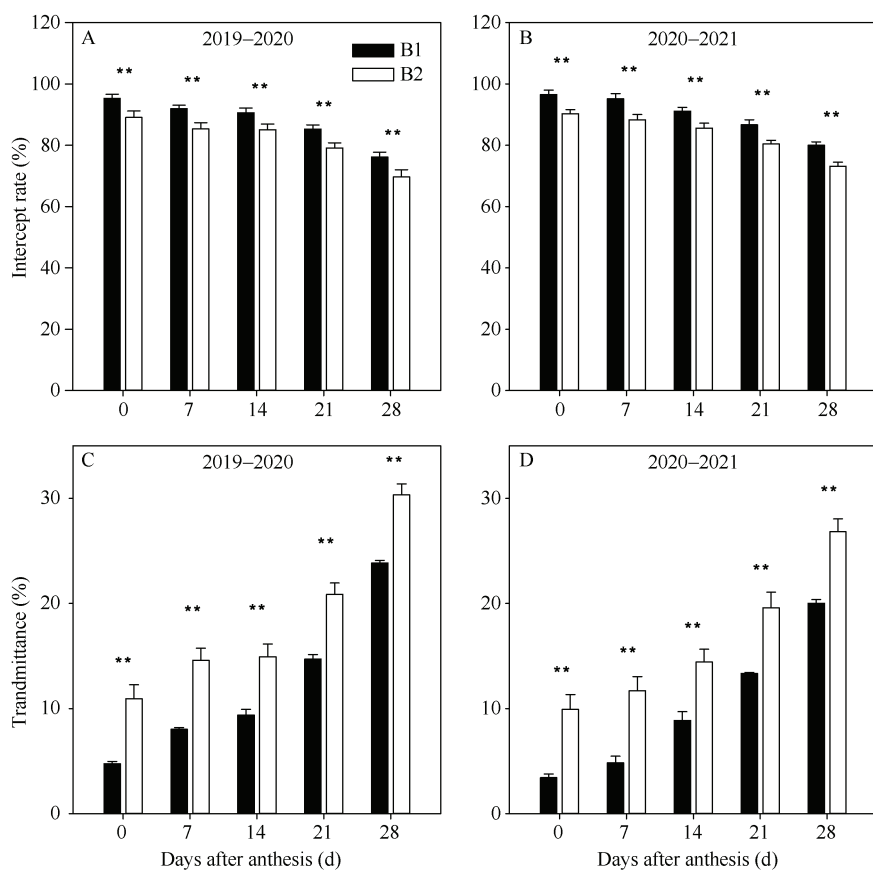


图 2 不同处理开花后冠层光合有效辐射截获率和透射率

Fig. 2 Intercept rate and transmittance of photosynthetic effective radiation of canopy after anthesis under different treatments

A, B, C, D 分别表示 2019–2020 和 2020–2021 生长季光合有效辐射截获率和透射率。图中所示数据均为每处理测定的 3 次重复, **表示不同处理在 0.01 概率水平差异显著。

A, B, C and D represent the intercept rate and transmittance of photosynthetic effective radiation of canopy after anthesis in the 2019–2020 and 2020–2021 growing seasons, respectively. The data shown in the figure are all three replicates of each treatment. ** indicates significant differences between different treatments at the 0.01 probability level.

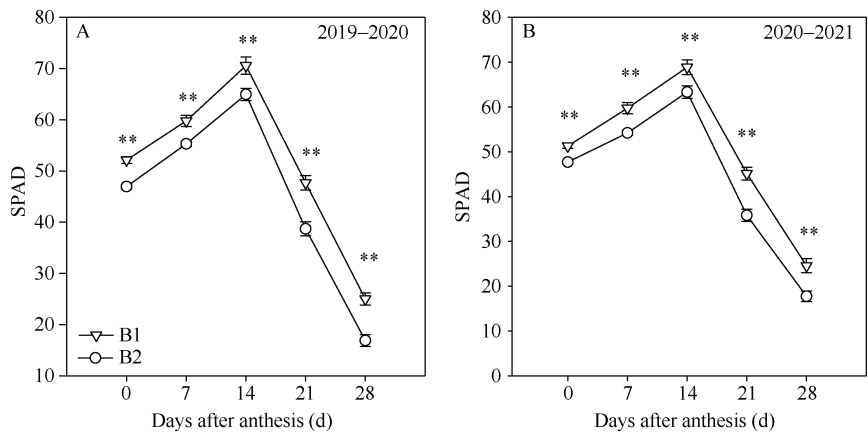


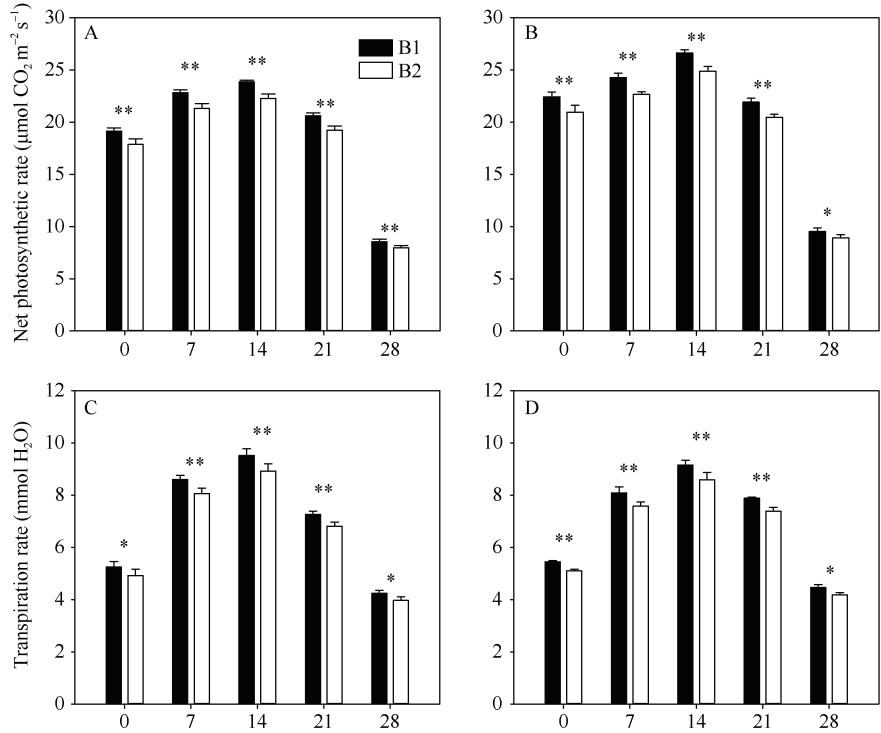
图 3 不同处理开花后旗叶叶绿素相对含量(SPAD)
Fig. 3 Relative chlorophyll content (SPAD) of flag leaves after anthesis under different treatments
A, B 分别表示 2019—2020 和 2020—2021 生长季开花后旗叶叶绿素相对含量。图中所示数据均为每处理测定的 3 次重复, **表示不同处理在 0.01 概率水平差异显著。
A and B represent the relative chlorophyll content of flag leaves after anthesis in the 2019—2020 and 2020—2021 growing seasons, respectively. The data shown in the figure are all three replicates of each treatment. ** indicates significant differences between different treatments at the 0.01 probability level.

季各处理开花后旗叶叶绿素相对含量均与 2019—2020 生长季试验结果变化趋势一致。结果表明, B1 处理延缓了开花后旗叶叶绿素的分解, 有利于进行光合物质生产。

2.4 开花后旗叶净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度

如图 4 所示, 2019—2020 生长季, 开花 0 d 和开花后 7、14、21、28 d 旗叶净光合速率、蒸腾速率

和气孔导度均为 B1 处理显著高于 B2 处理; 开花 0 d 和开花后 7、14、21、28 d 旗叶胞间二氧化碳浓度均为 B1 处理显著低于 B2 处理。2020—2021 生长季各处理开花后旗叶净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度均与 2019—2020 生长季试验结果变化趋势一致。结果表明, B1 处理可以显著提高开花后旗叶净光合速率、蒸腾速率和气孔导度, 为光合物质生产奠定基础。



(图 4)

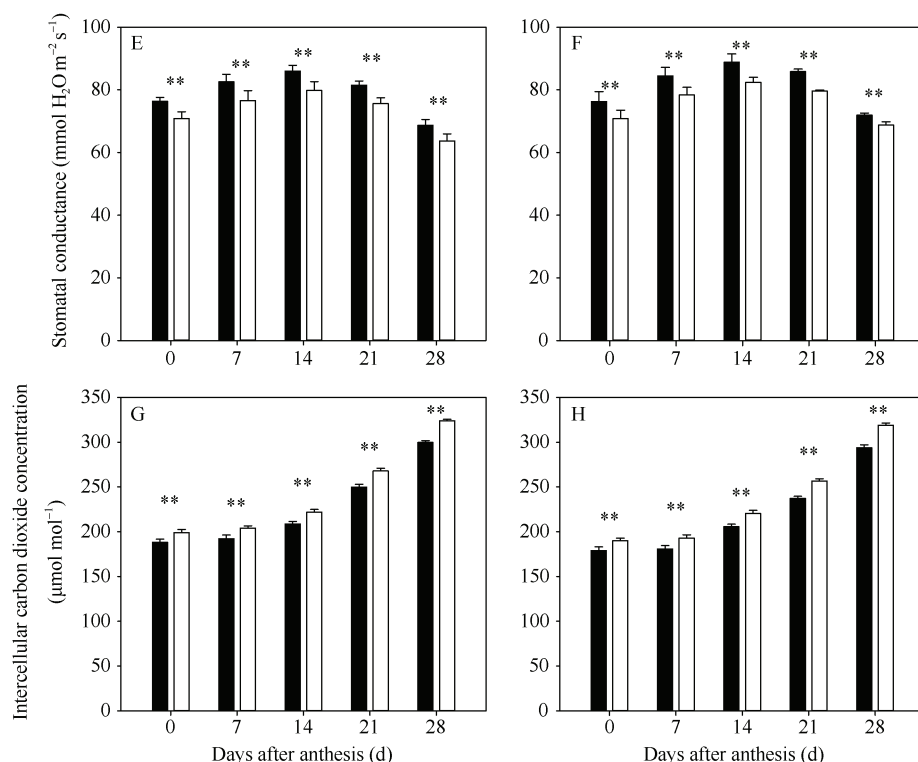


图 4 不同处理开花后旗叶净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度

Fig. 4 The net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular carbon dioxide concentration of flag leaf after anthesis under different treatments

A、C、E、G 分别表示 2019—2020 生长季开花后旗叶净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度, B、D、F、H 分别表示 2020—2021 生长季开花后旗叶净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度; 图中所示数据均为每处理测定的 3 次重复, *、** 表示不同处理在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

A, C, E, and G represent the net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular carbon dioxide concentration of flag leaves after anthesis in the 2019—2020 growing season, respectively; B, D, F and H represent the net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular carbon dioxide concentration of flag leaves after anthesis in the 2020—2021 growing season, respectively. The data shown in the figure are all three replicates of each treatment. * and ** indicate significant differences between different treatments at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.5 开花期和成熟期干物质积累量

如表 1 所示, 2019—2020 生长季, 开花期和成熟期干物质积累量均为 B1 处理显著高于 B2 处理, B1 处理开花期和成熟期干物质积累量比 B2 处理分别高 8.23%、8.08%。2020—2021 生长季各处理开花期和成熟期干物质积累量均与 2019—2020 生长季试验结果变化趋势一致。结果表明, B1 处理显著增加了开花期和成熟期干物质积累量, 为获得高产奠定了物质基础。

2.6 开花后干物质转运量

如表 2 所示, 2019—2020 生长季, 开花前营养器官贮藏干物质向籽粒的转运量处理间无显著差异, 对籽粒的贡献率为 B1 处理显著低于 B2 处理; 开花后干物质在籽粒中的分配量以 B1 处理较高, B1 处理开花后干物质在籽粒中的分配量比 B2 处理高 7.76%, 开花后干物质在籽粒中的分配量对籽粒的贡献率处

理间无显著差异。2020—2021 生长季各处理开花前营养器官贮藏干物质向籽粒的转运量及其对籽粒的贡献率和开花后干物质在籽粒中的分配量及其对籽

表 1 不同处理开花期和成熟期干物质积累量

Table 1 Dry matter accumulation in anthesis and maturity of different treatments

年份 Year	处理 Treatment	干物质积累量 Dry matter accumulation amount (kg hm ⁻²)			
		开花期 Anthesis		成熟期 Maturity	
2019—2020	B1	13,468.22	a	19,518.79	a
	B2	12,444.63	b	18,059.69	b
2020—2021	B1	14,451.76	a	22,673.16	a
	B2	13,353.42	b	20,945.94	b

表中所示数据均为样品 3 次重复的平均值, 同一列数据后边字母表示在 0.05 概率水平差异显著 (LSD 法)。

The data shown in the table are the average values of three replicates of the sample, and the letters after the data in the same column indicate significant differences at the 0.05 probability level (LSD method).

表 2 不同处理开花后营养器官同化物再分配量
Table 2 Dry matter allocation amounts from vegetative organs after anthesis under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	开花前营养器官贮藏同化物		开花后干物质	
		Pre-anthesis reserves		Post-anthesis assimilates	
		转运量 Translocated into grain (kg hm ⁻²)	对籽粒贡献率 Contribution to grain (%)	籽粒中的分配量 Allocation to grain (kg hm ⁻²)	对籽粒贡献率 Contribution to grain (%)
2019—2020	B1	3283.41 a	35.18 b	6050.54 a	64.82 a
	B2	3367.61 a	37.49 a	5615.06 b	62.51 a
2020—2021	B1	2152.22 a	20.75 b	8221.43 a	79.25 a
	B2	2361.85 a	23.73 a	7592.52 b	76.27 a

表中所示数据均为样品 3 次重复的平均值, 同一列数据后边字母表示在 0.05 概率水平差异显著(LSD 法)。
The data shown in the table are the average values of three replicates of the sample, and the letters after the data in the same column indicate significant differences at the 0.05 probability level (LSD method).

粒的贡献率均与 2019—2020 生长季试验结果变化趋势一致。结果表明, B1 处理显著增加了开花后干物质在籽粒中的分配量, 有利于增加粒重。

2.7 成熟期各器官干物质积累量

如表 3 所示, 2019—2020 生长季, 成熟期干物质在茎秆+叶鞘、叶片、穗轴+颖壳和籽粒中的分配量均为 B1 处理显著高于 B2 处理, B1 处理的成熟期籽粒干物质积累量比 B2 处理高 8.59%。2020—2021 生长季各处理成熟期各器官干物质积累量均与 2019—2020 生长季试验结果变化趋势一致。结果表

明, B1 处理显著增加成熟期干物质积累, 其成熟期籽粒干物质积累量显著高于常规播种处理, 有利于获得高产。

2.8 产量构成因素、籽粒产量和光能利用率

如表 4 所示, 2019—2020 生长季, 穗数、千粒重、籽粒产量和光能利用率均以 B1 处理较高, B1 处理的穗数、千粒重、籽粒产量和光能利用率比 B2 处理分别高 6.16%、6.60%、6.12%、7.14%, 穗粒数和光能转化率处理间均无显著性差异。2020—2021 生长季各处理产量构成因素、籽粒产量、光

表 3 不同处理成熟期各器官干物质积累量
Table 3 Dry matter accumulation amounts in different organs at maturity under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	成熟期干物质积累量 Dry matter accumulation amounts in maturity (kg hm ⁻²)			
		茎秆+叶鞘	叶片	穗轴+颖壳	籽粒
		Stem and sheath	Leaf	Spike axis and glume	Grain
2019—2020	B1	4759.94 a	1836.29 a	3168.63 a	9753.93 a
	B2	4548.33 b	1697.61 b	2831.08 b	8982.67 b
2020—2021	B1	6100.18 a	1958.16 a	3805.76 a	10,809.06 a
	B2	5785.97 b	1807.63 b	3397.97 b	9954.37 b

表中所示数据均为样品 3 次重复的平均值, 同一列数据后边字母表示在 0.05 概率水平差异显著(LSD 法)。
The data shown in the table are the average values of three replicates of the sample, and the letters after the data in the same column indicate significant differences at the 0.05 probability level (LSD method).

表 4 不同处理产量构成因素、籽粒产量及光能利用率
Table 4 Yield components, grain yield and light energy utilization under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	穗数	穗粒数	千粒重	籽粒产量	光能转化率	光能利用率
		Spike number (×10 ⁴ hm ⁻²)	Grain number per spike	1000-grain weight (g)	Grain yield (kg hm ⁻²)	PCE (g MJ ⁻¹)	PUE (g MJ ⁻¹)
2019—2020	B1	642.73 a	38.39 a	44.25 a	9333.90 a	2.34 a	1.05 a
	B2	605.45 b	37.97 a	41.51 b	8795.33 b	2.31 a	0.98 b
2020—2021	B1	660.76 a	40.99 a	47.65 a	10,343.60 a	3.15 a	1.44 a
	B2	622.44 b	40.54 a	43.70 b	9746.77 b	3.10 a	1.33 b

表中所示数据均为样品 3 次重复的平均值, 同一列数据后边字母表示在 0.05 概率水平差异显著(LSD 法)。
The data shown in the table are the average values of three replicates of the sample, and the letters after the data in the same column indicate significant differences at the 0.05 probability level (LSD method).

能转化率和光能利用率均与 2019—2020 生长季试验结果变化趋势一致。结果表明, B1 处理显著提高了穗数和千粒重, 获得了最高的籽粒产量和光能利用率。

3 讨论

3.1 播幅对小麦冠层光能利用的影响

开花期至成熟期是小麦籽粒产量形成的关键生育阶段, 提高开花后冠层光截获和改善开花后光合特性有利于增加光合物质生产和籽粒干物质积累^[16]。研究表明, 行距为 22.5 cm 处理的开花后叶面积指数和光能利用率比行距 30 cm 处理分别高 6.45% 和 7.94%, 适宜行距有利于小麦植株充分利用光温资源^[17]。本研究中, B1 处理(播幅 8 cm)开花后叶面积指数和冠层光合有效辐射截获率均显著高于 B2 处理(播幅 3 cm), B1 处理获得了最高的光能利用率进一步证明了增加播幅可以显著改善冠层结构和增加对光合有效辐射的截获利用; 造成与前人研究结果不同的原因可能是本研究是在节水栽培条件下进行的, 而前人则是在定量灌溉或常规漫灌条件下进行研究, 由此导致播幅对小麦冠层结构和光截获的调节效应的差异。另有研究表明, 基本苗密度为 360 万株 hm^{-2} 处理的开花后旗叶净光合速率和实际光化学效率比基本苗密度为 240 万株 hm^{-2} 、480 万株 hm^{-2} 处理分别高 6.48%、7.45% 和 5.98%、5.77%, 适宜的基本苗密度可以显著提高开花后旗叶光合性能^[18]。本研究结果表明, B1 处理显著提高了小麦开花后旗叶净光合速率、蒸腾速率和气孔导度, 究其原因可能是增加播幅优化了冠层光能分布与截获性能, 促进了光能的高效利用, 从而显著改善了开花后叶片光合性能; 减少播幅则导致小麦群体内部通风透光性差, 加速了叶片衰老, 抑制了光合作用。此外, 年际间结果表明, 2020—2021 生长季开花后冠层光截获性能和旗叶光合指标均显著高于 2019—2020 生长季, 造成年际间结果差异的原因可能是小麦季内降水量的差异导致, 2020—2021 生长季内较高的降水量可以有效延缓植株衰老, 改善开花后光合性能。

3.2 播幅对小麦干物质积累、转运与分配的影响

小麦籽粒产量的提升主要取决于开花前营养器官贮藏干物质的转运和开花后光合同化物的积累^[19-20]。研究表明, 基本苗密度为 375.0 万株 hm^{-2} 处理的拔节期、开花期和成熟期干物质积累量均显著高于基本苗密度为 562.5、750.0、937.5 万株 hm^{-2} 处理, 分

别达 2850、10,932、15,416 kg hm^{-2} ^[21]。本研究中, B1 处理显著增加了小麦开花期和成熟期干物质积累量, 为获得高产奠定了物质基础; 与前人在定量灌溉条件下研究相比, 本研究基于小麦关键生育时期土壤水分含量进行精准灌溉, 灌溉后各处理土壤水分含量一致, 消除了因土壤水分含量造成的差异。研究表明, 基本苗密度为 60 万株 hm^{-2} 处理的开花后营养器官贮藏干物质向籽粒的转运量比基本苗密度为 100、140、180 万株 hm^{-2} 处理分别高 6.45%、6.84%、7.06%^[22]。但有研究表明, 基本苗密度为 468.8 万株 hm^{-2} 处理成熟期籽粒干物质积累量比基本苗密度为 375 万株 hm^{-2} 、562.5 万株 hm^{-2} 处理分别高 7.64% 和 13.68%, 适宜的基本苗密度可以增加成熟期籽粒干物质积累^[19]。本研究结果表明, B1 处理显著提高了开花后干物质在籽粒中的分配量, 是其成熟期籽粒干物质积累量最高的主要原因; 究其原因可能是 B1 处理有利于小麦植株充分利用水肥等资源, 为开花后光合物质生产提供了充足的水肥供应^[24]。各处理年际间干物质积累、转运与分配结果表明, 2020—2021 生长季开花期和成熟期干物质积累量、开花后干物质在籽粒中的分配量均显著高于 2019—2020 生长季, 但开花前营养器官贮藏干物质向籽粒的转运量及其对籽粒的贡献率显著低于 2019—2020 生长季; 究其原因可能是 2020—2021 生长季总降水量和开花期至成熟期阶段降水量较多, 有效延缓了植株衰老, 增加了光合物质生产和积累。

3.3 播幅对小麦籽粒产量的影响

小麦产量构成因素的协调发展是获得高产的关键因素, 播幅、行距等栽培管理方式是调控小麦群体结构的重要途径, 对群体发育和产量构成起着决定性作用^[24-25,26]。研究表明, 行距为 19 cm 处理的籽粒产量比行距为 17 cm 处理高 9.72%^[27]。另有研究表明, 行距为 25 cm 处理的籽粒产量比行距为 20 cm、30 cm 处理分别高 6.08% 和 5.21%^[28]。本研究中, 相较于 B2 处理, B1 处理显著提高了籽粒产量, 因为增加播幅有利于个体健壮, 进而提高籽粒产量, 减少播幅导致个体生长空间缩小, 对水分、肥料和光能的竞争增加, 导致籽粒产量降低。有研究表明, 行距为 20 cm 处理的籽粒产量比行距为 10 cm 处理分别高 17.56%, 籽粒产量的提高归因于公顷穗数的提高, 其公顷穗数比行距为 10 cm 处理高 23.96%, 达 $5.38 \times 10^6 \text{ hm}^{-2}$ ^[24]。与前人研究将宽幅处理籽粒产量的提高归因于穗粒数和千粒重的增加不同, 本研

究中,我们将B1处理籽粒产量的提高归因于穗数和千粒重的增加,造成与前人研究结果不一致的原因可能是前人研究多在定量灌溉条件下进行,由于灌溉前各处理土壤水分含量未必一致,导致灌溉后土壤水分含量存在差异,而本研究在测墒补灌基础上,保证了灌溉后土壤水分含量的一致,灌溉后土壤水分含量的差异可能是造成与前人研究结果不同的原因;此外,外部环境因素亦对穗粒数有显著影响,因此,关于在不同地区或土壤类型条件下播幅对小麦籽粒产量形成的调控效应差异原因有待进一步研究。在本研究中,2020—2021生长季各产量构成因素和籽粒产量均显著高于2019—2020生长季;究其原因可能是2020—2021生长季总降水量较多,保证了小麦生长季的水分需求,有利于提高产量。

4 结论

在本试验条件下,相较于播幅为3 cm处理,播幅为8 cm处理显著提高了小麦开花后旗叶净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和冠层光合有效辐射截获率,有利于光合物质生产;提高了开花期和成熟期干物质积累量、开花后干物质在籽粒中的分配量,增加了穗数及千粒重,获得了最高的籽粒产量和光能利用率。表明,播幅为8 cm处理是本试验条件下小麦高产的最优播幅。

References

- [1] Ma S T, Wang T C, Ma S C. Effects of drip irrigation on root activity patterns, root-sourced signal characteristics and yield stability of winter wheat. *Agric Water Manag*, 2022, 271: 107783.
- [2] Wang Z X, Khan S, Sun M, Ren A X, Lin W, Ding P C, Noor H, Yu S B, Feng Y, Wang Q, Gao Z Q. Optimizing the wheat seeding rate for wide-space sowing to improve yield and water and nitrogen utilization. *Int J Plant Prod*, 2021, 15: 553–562.
- [3] Feng S, Gu S, Zhang H, Wang D. Root vertical distribution is important to improve water use efficiency and grain yield of wheat. *Field Crops Res*, 2017, 214: 131–141.
- [4] Liu Y, Liao Y C, Liu W Z. High nitrogen application rate and planting density reduce wheat grain yield by reducing filling rate of inferior grain in middle spikelets. *Crop J*, 2021, 9: 412–426.
- [5] Zhao H X, Zhang P, Wang Y Y, Ning T Y, Xu C L, Wang P. Canopy morphological changes and water use efficiency in winter wheat under different irrigation treatments. *J Integr Agric*, 2020, 19: 1105–1116.
- [6] 赵刚, 樊廷录, 李兴茂, 张建军, 党翼, 李尚中, 王磊, 王淑英, 程万莉, 倪胜利. 宽幅播种旱作冬小麦幅间距与基因型对产量和水分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2020, 53: 2171–2181.
Zhao G, Fan T L, Li X M, Zhang J J, Dang Y, Li S Z, Wang L, Wang S Y, Cheng W L, Ni S L. Effects of wide-range distance and genotype on yield and water use efficiency of winter wheat. *Sci Agric Sin*, 2020, 53: 2171–2181 (in Chinese with English abstract).
- [7] Munkholm L Z, Hansen E M, Thomsen I M, Wahlström E, Ostergaard H. Nitrogen uptake, nitrate leaching and root development in winter-grown wheat and fodder radish. *Soil Use Manag*, 2017, 33: 233–240.
- [8] 李拴良, 任长宏, 格桑曲珍, 赵宗财, 张宗卷, 胡希远. 宽幅硬茬播种对冬小麦生长、产量及品质的效应. *麦类作物学报*, 2015, 35: 80–85.
Li S L, Ren C H, Gesangquzhen, Zhao Z C, Zhang Z J, Hu X Y. Effect of No-tilled wide planting pattern on growth, yield and quality of winter wheat. *J Triticeae Crops*, 2015, 35: 80–85 (in Chinese with English abstract).
- [9] 韩占江, 于振文, 王东, 张永丽, 许振柱. 测墒补灌对冬小麦氮素积累与转运及籽粒产量的影响. *生态学报*, 2011, 31: 1631–1640.
Han Z J, Yu Z W, Wang D, Zhang Y L, Xu Z Z. Effects of supplemental irrigation based on measured soil moisture on nitrogen accumulation, distribution and grain yield in winter wheat. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31: 1631–1640 (in Chinese with English abstract).
- [10] 徐龙龙, 殷文, 胡发龙, 范虹, 范志龙, 赵财, 于爱忠, 柴强. 水氮减量对地膜玉米免耕轮作小麦主要光合生理参数的影响. *作物学报*, 2022, 48: 437–447.
Xu L L, Yin W, Hu F L, Fan H, Fan Z L, Zhao C, Yu A Z, Chai Q. Effect of water and nitrogen reduction on main photosynthetic physiological parameters of film-mulched maize no-tillage rotation wheat. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 437–447 (in Chinese with English abstract).
- [11] Fan Y L, Liu J M, Zhao J T, Ma Y Z, Li Q Q. Effects of delayed irrigation during the jointing stage on the photosynthetic characteristics and yield of winter wheat under different planting patterns. *Agric Water Manag*, 2019, 221: 371–376.
- [12] 王海琪, 王荣荣, 蒋桂英, 尹豪杰, 晏世杰, 车子强. 施氮量对滴灌春小麦叶片光合生理性状的影响. *作物学报*, 2023, 49: 211–224.
Wang H Q, Wang R R, Jiang G Y, Yin H J, Yan S J, Che Z Q. Effect of amount of nitrogen fertilizer applied on photosynthetic physiological characteristics of drip irrigated spring wheat leaves. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 211–224 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李宇星, 马亮亮, 张月, 秦博雅, 张文静, 马尚宇, 黄正来, 樊永惠. 外源海藻糖对灌浆期高温胁迫下小麦旗叶生理特征和产量的影响. *作物学报*, 2023, 49: 2210–2224.
Li Y X, Ma L L, Zhang Y, Qin B Y, Zhang W J, Ma S Y, Huang Z L, Fan Y H. Effects of exogenous trehalose on physiological characteristics and yield of wheat flag leaves under high temperature stress at grain filling stage. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 2210–2224 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李盼, 陈桂平, 苟志文, 殷文, 樊志龙, 胡发龙, 范虹, 柴强. 绿洲灌区春小麦光能利用与水分生产效益对秸秆还田方式的响应. *作物学报*, 2023, 49: 1316–1326.
Li P, Chen G P, Gou Z W, Yin W, Fan Z L, Hu F L, Fan H, Chai Q. Response on light energy utilization and water production benefit of spring wheat to straw retention in an oasis irrigated area. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 1316–1326 (in Chinese with Eng-

- lish abstract).
- [15] 丁永刚, 陈立, 董金鑫, 朱敏, 李春燕, 朱新开, 丁锦峰, 郭文善. 高产高效型半冬性小麦品种的产量构成、氮素积累转运和籽粒品质特征分析. *作物学报*, 2022, 48: 3144–3154.
Ding Y G, Chen L, Dong J X, Zhu M, Li C Y, Zhu X K, Ding J F, Guo W S. Characteristics of yield components, nitrogen accumulation and translocation, and grain quality of semi-winter cultivars with high-yield and high-efficiency. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 3144–3154 (in Chinese with English abstract).
- [16] Abichou M, Solan B D, Andrieu B. Architectural response of wheat cultivars to row spacing reveals altered perception of plant density. *Front Plant Sci*, 2019, 10: 00999.
- [17] Farooq M, Hussain M, Habib M M, Khan M S, Ahmad I, Farooq S, Siddique K H M. Influence of seed priming techniques on grain yield and economic returns of bread wheat planted at different spacings. *Crop Past Sci*, 2020, 71: 725–738.
- [18] Dai Y L, Fan J L, Liao Z Q, Zhang C, Yu J, Feng H L, Zhang F C, Li Z J. Supplemental irrigation and modified plant density improved photosynthesis, grain yield and water productivity of winter wheat under ridge-furrow mulching. *Agric Water Manag*, 2022, 274: 107985.
- [19] Angelique T, Etienne N, Innocent M, Wansim A N, Chuan L, Tian Q H, Bosco J S, Jiang B H. The combined effect of different sowing methods and seed rates on the quality features and yield of winter wheat. *Agriculture*, 2020, 10: 153.
- [20] 冯学颖, 刘景辉, 赵宝平, 王英, 陈晓晶, 徐忠山. 宽幅条播和种植密度对燕麦光合特性及干物质积累量的影响. *麦类作物学报*, 2022, 42: 1527–1534.
Feng X Y, Liu J H, Zhao B P, Wang Y, Chen X J, Xue Z S. Effects of wide sowing and planting density on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of oat. *J Triticeae Crops*, 2022, 42: 1527–1534 (in Chinese with English abstract).
- [21] Zhang J J, Mu J Y, Hu Y N, Ren A X, Lei B, Ding P C, Li L H, Sun M, Gao Z Q. Effect of planting patterns and seeding rate on dryland wheat yield formation and water use efficiency on the loess plateau, China. *Agronomy*, 2023, 13, 851.
- [22] Hiromi M, Taiichiro O. The effects of seeding rate on yield, lodging resistance and culm strength in wheat. *Plant Prod Sci*, 2019, 23: 322–332.
- [23] May W E, Aldous L, Lafond G P. Feasibility of a wider row spacing and recommended nitrogen in no-till wheat. *Agron J*, 2020, 112: 4076–4091.
- [24] Yang W J, Liu W J, Li Y L, Wang S W, Yin L N, Deng X P. Increasing rainfed wheat yield by optimizing agronomic practices to consume more subsoil water in the Loess Plateau. *Crop J*, 2021, 9: 1418–1427.
- [25] Kassu T K, Wubengeda A Y. Seeding and NP fertilizer rates effect on irrigated wheat yield and water use efficiency in midland tropical environment. *J Soil Sci Plant Nutr*, 2022, 22: 1490–1505.
- [26] 吕广德, 殷复伟, 孙盈盈, 钱兆国, 徐加利, 李宁, 薛丽娜, 吴科. 不同播种量对临麦 4 号产量和干物质积累及分配的影响. *作物杂志*, 2020, (3): 142–148.
Lyu G D, Yin F W, Sun Y Y, Qian Z G, Xu J L, Li N, Xue L, Wu K. Effects of different seeding rates on yield, dry matter accumulation and distribution of Linmai 4. *Crops*, 2020, (3): 142–148 (in Chinese with English abstract).
- [27] Schmitz P K, Ransom J K. Seeding rate effects on hybrid spring wheat yield, yield components, and quality. *Agronomy*, 2021, 11: 1240.
- [28] 吕鹏, 吕广德, 鞠正春, 高瑞杰, 钱兆国, 庞慧, 吴科, 韩伟. 宽幅播种条件下行距对小麦产量及干物质积累和转运的影响. *麦类作物学报*, 2021, 41: 232–237.
Lyu P, Lyu G D, Ju Z C, Gao R J, Qian Z G, Pang H, Wu K, Han W. Effects of row spacing on wheat yield and dry matter accumulation and transport under wide planting. *J Triticeae Crops*, 2021, 41: 232–237 (in Chinese with English abstract).