

# 超晚播节水栽培冬小麦品种花后光合与灌浆特性

王彬, 张萌, 陈景天, 张英华, 黄琴, 王志敏

中国农业大学农学院, 北京 100193

**摘要** 为探寻黑龙港地区超晚播节水栽培条件下冬小麦的适宜品种, 采用大穗型(潍麦8号)、小穗型(衡水4399)和中间穗型(济麦22)3种不同类型品种连续3年进行大田试验, 研究了不同穗型品种的花后光合特性和籽粒灌浆特征。结果表明, 在超晚播栽培下, 不同品种产量的差异主要是千粒重的差异; 3个品种中济麦22千粒重和产量均最高, 主要是由于灌浆持续期特别是活跃灌浆期较长、灌浆后期的灌浆速率较高所致。与潍麦8号和衡水4399比较, 济麦22在灌浆后期不仅具有较高的光截获率, 还具有较高的叶片光合活性, 这是其灌浆期较长、后期灌浆速率较高的主要原因。因此, 中间穗型品种济麦22是黑龙港地区超晚播节水高产栽培的适宜品种。

**关键词** 冬小麦; 品种; 千粒重; 光合作用; 籽粒灌浆

华北黑龙港低平原区, 水资源严重短缺。小麦生产中依靠地下水大量灌溉, 地下水位下降导致的生态环境问题日益严峻<sup>[1]</sup>。近年推广节水栽培技术, 小麦适当晚播, 冬前主茎叶龄从6~7叶降到4~5叶, 减少了冬前耗水, 在足墒播种条件下, 常年可免浇越冬水, 春季浇2次水即可获得高产<sup>[2]</sup>。在此基础上进一步减少灌溉量, 由目前的春浇2水转向春浇1水, 对缓解当地水资源短缺和地下水位下降具有积极意义。在春浇1水的有限灌溉下, 进一步推迟播期可能是大幅减少前期耗水、并使春季浇水时间后移从而提高水分利用效率的重要途径。从现实生产看, 该地区目前主要种植的作物是小麦、玉米和棉花, 主要的种植制度是冬小麦—夏玉米一年两熟制和棉花—熟制, 并实行相互轮作倒茬。近年来, 随着结构调整和经济高效作物的发展, 种植辣椒和朝天椒的面积在不断扩大, 这些作物也需和小麦轮作倒茬。由于棉花和辣椒等作物收获晚、腾茬迟, 加之底墒或机械劳力不足等原因使得后茬冬小麦过晚播种现象普遍存在<sup>[3]</sup>, 许多麦田播期被推迟到10月底至11月上中旬, 此期播种的冬小麦冬前积温常在300℃·d以下, 冬前叶龄小于3叶, 最晚播的冬前不能出苗, 俗称“土里捂”。冬前叶龄小于3叶的小麦称为超晚播小麦。

小麦超晚播有利于减少耗水, 但不利于提高产量。由于超晚播小麦冬前无分蘖, 春后主茎成穗, 其穗数主要依靠基本苗, 栽培上需根据穗数指标确定基本苗和播种量。由于基本苗多和春后发育晚, 使得穗粒数的潜力难以发挥, 产量的高低与千粒重的高低有很大关系, 如何提高千粒重成为超晚播小麦高产栽培的关键。

小麦品种的千粒重决定于品种的灌浆持续期和灌浆速率两个因素, 而这两个因素又受品种的遗传生理特性和栽培环境的共同影响。在常规栽培条件下, 不同品种的籽粒发育过程与灌浆特性已有较多研究报道, 但在超晚播、大群体和有限灌溉条件下, 有关小麦籽粒灌浆动态特征及其品种间差异性的研究鲜有报道。本试验比较研究了不同穗型冬小麦品种花后光合性能和籽粒灌浆过程对超晚播节水栽培的反应特征, 以期为该地区冬小麦超晚播节水栽培适宜品种选择提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

大田试验于2010年11月—2013年6月在河北省沧州市

收稿日期: 2017-05-04; 修回日期: 2017-06-31

基金项目: 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2016YFD0300401, 2016YFD0300105); 《科技导报》博士生创新研究资助计划项目(kjdb201208); 国家自然科学基金项目(31401297); 国家小麦产业技术体系建设专项(CARS-3)

作者简介: 王彬, 博士研究生, 研究方向为作物高产高效栽培生理, 电子信箱: binwang2006@126.com; 王志敏(通信作者), 教授, 研究方向为作物高产栽培与生理, 电子信箱: zhimin206@263.net

引用格式: 王彬, 张萌, 陈景天, 等. 超晚播节水栽培冬小麦品种花后光合与灌浆特性[J]. 科技导报, 2017, 35(18): 86-91; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.18.011

中国农业大学吴桥试验站(37°41'N, 116°37'E)进行。试验地点位于黑龙港平原中部,海拔高度 20 m,地下水位 7~9 m。土壤为黏壤土,0~40 cm 土层含有有机质 1.05%,全氮 0.08%,速效磷为 14.93 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 107.20 mg·kg<sup>-1</sup>。3 个试验年份冬小麦生长季的降水量和平均气温分别为:61 mm 和 8.5℃、148 mm 和 8.2℃及 129 mm 和 7.3℃,逐月降水量和平均气温见图 1。

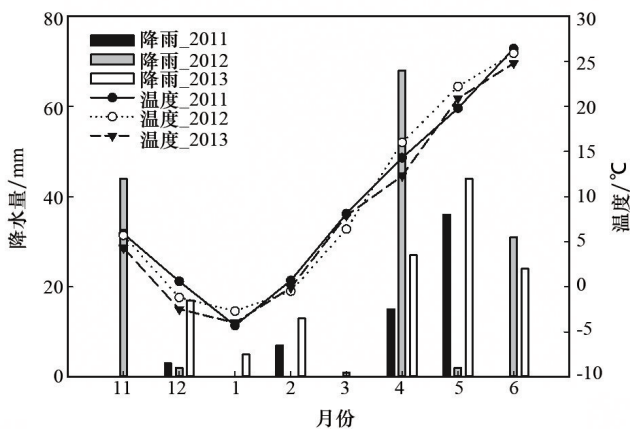


图 1 小麦生长季逐月降水量和平均气温(2011—2013)

Fig. 1 Monthly total precipitation and average air temperature in three growing seasons

## 1.2 试验设计

供试品种为 3 个不同类型的冬小麦:衡水 4399(HS4399, 小穗小叶型)、潍麦 8 号(WM8, 大穗大叶型)和济麦 22(JM22, 中穗中叶型)。分别设置 4 个重复,随机区组排列。在足墒播种、安全越冬的基础上,春浇拔节水 1 水(灌水量 75 mm)。3 个试验年份冬小麦分别于 2010 年 11 月 11 日、2011 年 11 月 13 日和 2013 年 11 月 15 日播种,下种量为 800 粒/m<sup>2</sup>,播深为 4~5 cm,行距 15 cm,冬前小麦出苗露尖 1~2 cm。播前每公顷施纯 N 157.5 kg、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 138 kg、K<sub>2</sub>O 105 kg 和 ZnSO<sub>4</sub> 22.5 kg,均做底肥一次性施入,春季不再追肥。其他管理措施参照小麦节水高产栽培技术<sup>[4]</sup>。

## 1.3 测定指标与方法

### 1.3.1 冠层光截获率

采用 LI-191SA 线性光量子传感器,分别于开花后 7、14 和 21 d 晴朗无风的 11:00—13:00,分别测定冠层顶部和底部光合有效辐射量  $I_0$  和  $I_f$ 。冠层光截获率由  $(I_0 - I_f)/I_0 \times 100\%$  公式计算求得。

### 1.3.2 叶绿素相对含量

采用 SPAD-502 叶绿素测定仪,在开花期每小区标记具代表性的植株 10 株,分别测定开花期、花后 7、14、21 和 28 d 旗叶的叶绿素相对含量(SPAD)值。测定时在同一叶片自基部至叶尖的上、中、下 3 个不同位点处读数,求平均值。

### 1.3.3 旗叶光合作用

于小麦灌浆中期晴天上午 10:00—11:00,利用光合仪(Li-6400)测定标记植株旗叶的气孔导度  $g_s$ (stomatal conduc-

tance)、光合速率  $P_n$ (photosynthetic rate)、蒸腾速率  $E$ (transpiration rate)和叶片水分效率  $WUE_{photo}$ (instantaneous water use efficiency),重复 3 次。

### 1.3.4 籽粒灌浆动态

于小麦开花期,在 3 个小区选取花期相同、长势相似、植株无病虫害、形状大小一致的麦穗挂牌标记。2010—2013 年 3 个生长季分别从开花后 6、7、10 d 开始取样,之后分别每隔 5、7 和 6 d 取样 1 次,直至籽粒成熟,每小区每次取样 10 穗带回室内,每穗人工剥出所有籽粒,立即在 105℃ 烘箱内杀青 20 min 后,恒温 75℃ 烘干至恒重。

用 Logistic 方程拟合花后籽粒灌浆特性,表示为

$$W = W_0 / (1 + Ae^{-bt}) \quad (1)$$

式中,  $W$  为花后籽粒千粒重,  $W_0$  为籽粒理论最大千粒重,  $A$  和  $B$  为方程参数,  $t$  为灌浆时间(开花期记为 0 d)。由方程一阶导数和二阶导数推导出相关灌浆特征参数。决定系数( $R^2$ )表示方程的拟合程度。 $V_{mean}$  为平均灌浆速率,  $mg \cdot d^{-1}$ ;  $D$  为活跃灌浆期,表示  $W$  从  $W_0$  的 5% 至 95% 的时间,  $d$ 。

### 1.3.5 经济产量

于成熟期从各小区选取 2 m<sup>2</sup> 样点,单独收割晾晒,脱粒称重,籽粒产量以 13% 含水量计算,均 3 次重复。

## 1.4 数据分析

采用 SAS 9.3 统计软件进行统计分析,利用 Excle 2010 和 SigmaPlot 12.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 产量和千粒重

如图 2(a) 所示,在超晚播栽培的 3 个品种中,济麦 22 的 3 年平均产量分别比潍麦 8 号和衡水 4399 高 6.57% 和 9.85%。品种间总粒数没有明显差异<sup>[5]</sup>,但千粒重差异显著(图 2(a)),济麦 22 千粒重最高,其 3 年均值比潍麦 8 号和衡水 4399 分别高 5.89% 和 10.30%。表明在超晚播有限灌溉下,3 种不同类型品种中,济麦 22 表现最为适宜,其高产主要来自于高千粒重。

### 2.2 冠层光截获率

三品种在灌浆前期叶面积指数无明显差异,随着灌浆进程三品种冠层光截获率逐渐降低,且降低程度逐渐增大(图 3)。花后 7 d 和 14 d 三品种冠层光截获率没有显著差异,但花后 21 d 时济麦 22 和潍麦 8 号的冠层光截获率显著高于衡水 4399。

### 2.3 旗叶叶绿素相对含量

如图 4 所示,三品种开花期旗叶叶绿素相对含量值无显著差异,随着灌浆进程的推进,SPAD 值呈现先升高后逐渐降低、且花后 21 d 后降低幅度增大的趋势。济麦 22 于花后 7、14 和 21 d 显著高于衡水 4399。

### 2.4 旗叶光合作用

如图 5 所示,叶片光合与水分利用指标品种间存在明显差异,3 年平均看,旗叶  $g_s$  和  $E$  品种间差异表现为潍麦 8 号 > 济

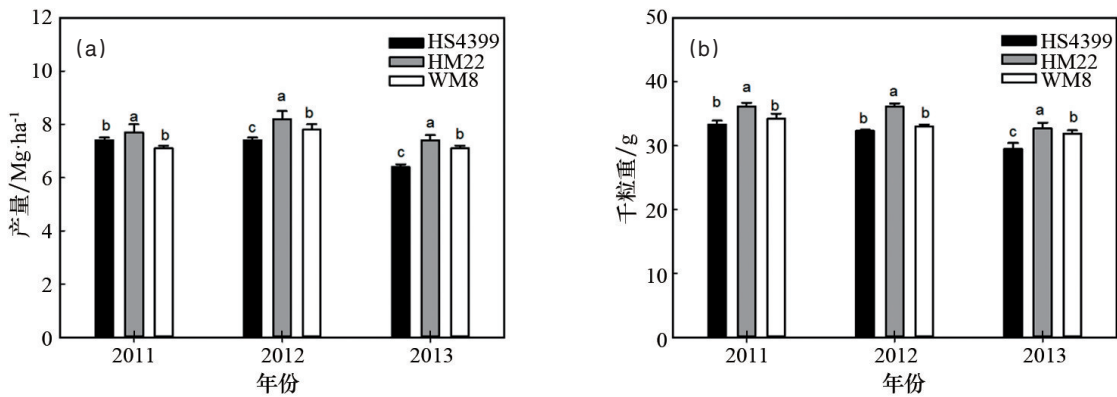


图2 超晚播冬小麦品种间产量(a)和千粒重(b) (2011—2013)

Fig. 2 (a) Grain yield and (b) 1000-grain weight for three winter wheat cultivars during 2011–2013

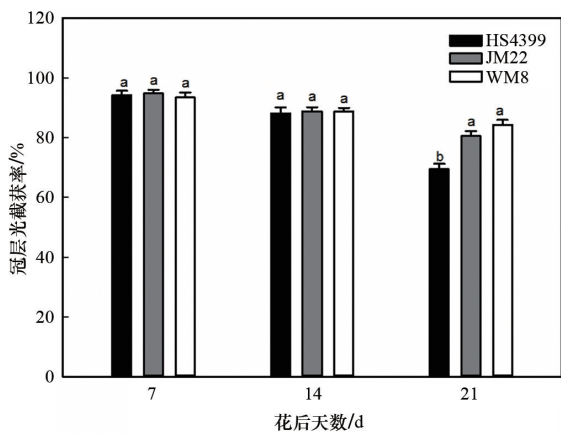


图3 冬小麦三品种间花后不同阶段的光截获率(2013)

Fig. 3 Light interception rate in different grain filling stages for three winter wheat cultivars in the growing season of 2013

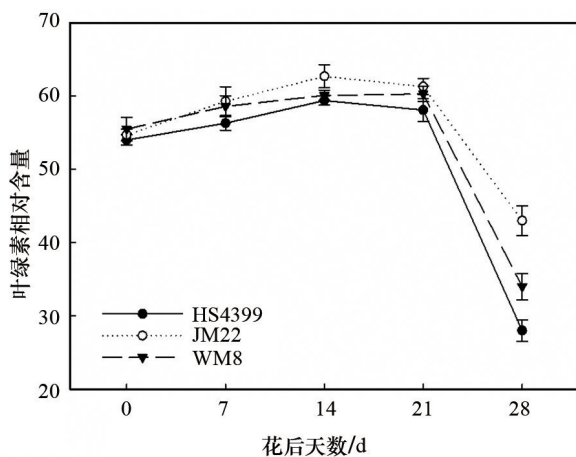


图4 限水超晚播条件下3个品种花后旗叶叶绿素相对含量(2013)

Fig. 4 SPAD in different grain filling stages for three winter wheat cultivars in the growing season of 2013

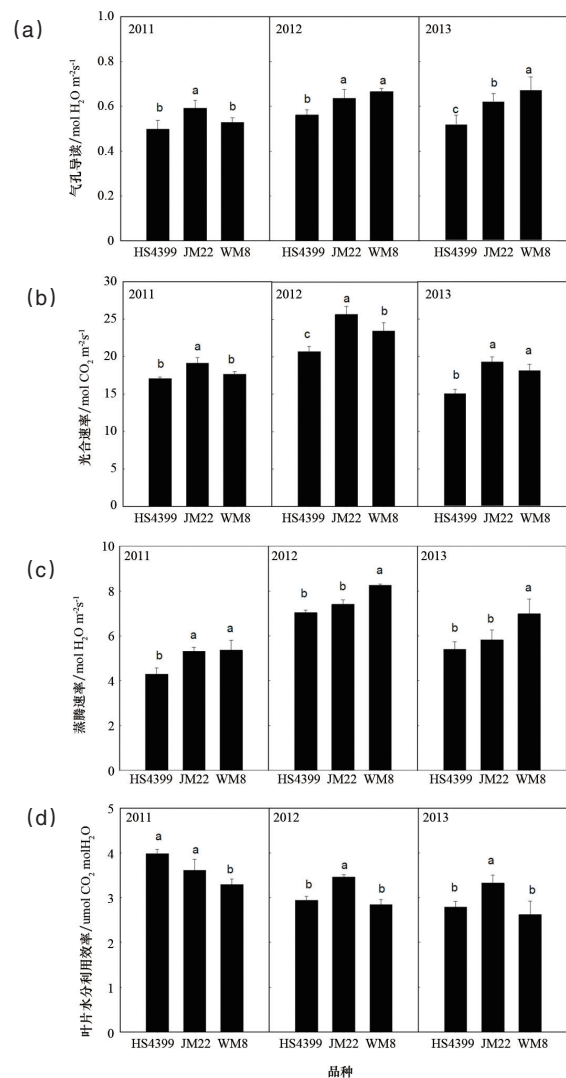


图5 不同品种灌浆中期旗叶气孔导度(a)、光合速率(b)、蒸腾速率(c)和叶片水分利用效率(d) (2011—2013)

Fig. 5 (a) Flag leaf Stomatal conductance, (b) photosynthetic rate, (c) transpiration rate, (d) and instantaneous water use efficiency in the mid-grain filling for three winter wheat cultivars during 2011–2013

麦22>衡水4399(图5(a)、图5(c)), $P_n$ 表现为济麦22>潍麦8号>衡水4399,叶片水分利用效率( $WUE_{photo}$ )表现为济麦22>衡水4399>潍麦8号。可见,在3个品种中,济麦22叶片光合和水分利用效率最高。

## 2.5 籽粒灌浆动态特征

图6显示了3个品种在3个年度籽粒灌浆过程中粒重变化动态。灌浆初期3个品种粒重之间无显著差异;灌浆中期衡水4399略高于济麦22和潍麦8号;灌浆后期济麦22显著高于潍麦8号和衡水4399。

分析表明,Logistic方程可以很好地拟合各品种粒重增长过程,拟合度达到0.99,呈极显著水平。进一步分析比较不同品种粒重方程特征值表明(表1),最大粒重( $W_{max}$ )品种间差异

显著,表现为济麦22>潍麦8号>衡水4399。最大灌浆速率( $V_{max}$ )和平均灌浆速率( $V_{avg}$ )品种间差异不显著,但最大灌浆速率出现的时间济麦22晚于其他品种。灌浆持续期( $T$ )和活跃灌浆持续期( $D$ )均表现为济麦22>潍麦8号>衡水4399,其差异达显著水平。

从各阶段灌浆速率看(图7),各品种灌浆速率均呈现出先增加后减少的单峰曲线,高峰值出现在花后15~25 d。在灌浆早期,衡水4399的灌浆速率高于其他品种;但在灌浆中后期,济麦22和潍麦8号的灌浆速率均高于衡水4399,特别是灌浆后期,济麦22的灌浆速率显著高于潍麦8号和衡水4399。

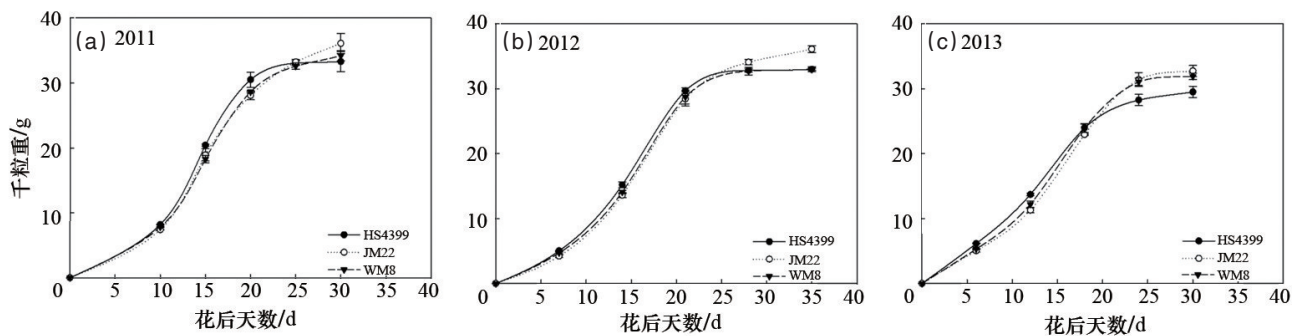


图6 限水晚播条件下3个品种的籽粒灌浆动态(2011—2013)

Fig. 6 Grain filling dynamic of the three cultivars under limited irrigation and late sown condition in the three growing seasons

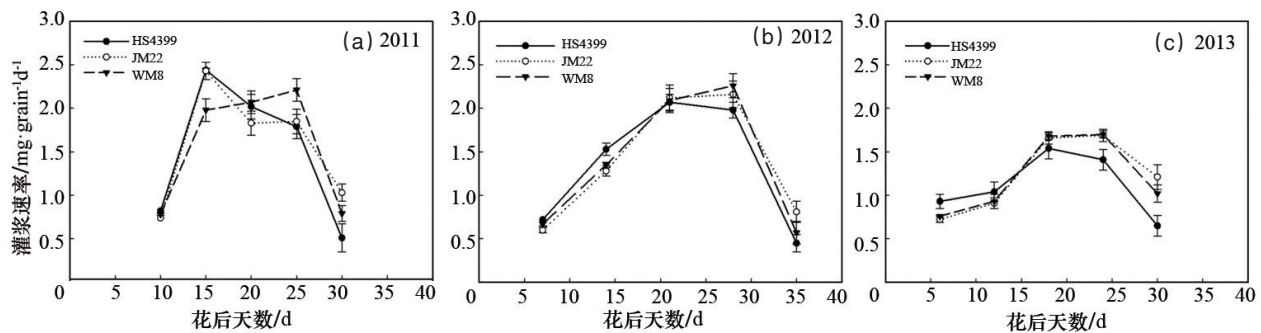


图7 限水晚播条件下3个品种的籽粒灌浆速率动态(2011—2013)

Fig. 7 Grain-filling rate dynamic of the three cultivars under limited irrigation and late sown condition in the three growing seasons

## 3 结果与讨论

本试验中冬小麦播期在11月中旬,为极端晚播,冬前小麦幼苗呈出土露尖状态。由于超晚播,营养生长期短,春季分蘖少且难以成穗,为保证足够穗数各品种均需采用最大播量。也由于超晚播,小麦拔节前耗水量明显减少,在足墒播种后春季浇水时间可推迟到拔节后期,且春浇1水即可基本满足中后期水分需要,这为冬小麦节水栽培提供了新的水分管理模式。如何在大播量、春浇1水的节水模式下提高小麦产量进而提高水分利用效率,是超晚播小麦栽培实践中需要

解决的核心问题。由于穗数靠基本苗保证,在大群体和超晚播穗分化时间短的条件下,增加穗粒数的难度很大,提高千粒重是提高超晚播小麦产量的关键。从本试验看,不同品种超晚播栽培产量的差异主要是千粒重的差异。因此需要选择适应超晚播条件、具有较高千粒重的品种。

研究发现,济麦22与潍麦8号和衡水4399相比具有较高的粒重,因而也具有较高的产量。一般随播期推迟花前贮藏物质积累减少<sup>[6]</sup>,花后物质生产对粒重形成具有更大作用。相关研究表明,不同穗型品种间冠层结构、叶片光合速率和

表1 限水晚播条件下3个品种小麦籽粒灌浆阶段特征(2011—2013)

Table 1 Grain-filling parameters in different stages for three cultivars under limited irrigation and late sown condition in the three growing seasons

年度	品种	最大粒重 $W_{max}/(\text{mg}\cdot\text{grain}^{-1})$	最大灌浆速率 $V_{max}/(\text{mg}\cdot\text{grain}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$	平均灌浆速率 $V_{avg}/(\text{mg}\cdot\text{grain}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$	$V_{max}$ 出现时间 $T_{max}/\text{d}$	灌浆期 $T/\text{d}$	活跃灌浆期 $D/\text{d}$
2011	HS4399	29.75	1.90	0.98	12.4	30.4	23.0
	JM22	34.04	2.04	1.00	14.8	34.0	24.6
	WM8	32.90	2.05	1.02	14.0	32.4	23.6
2012	HS4399	33.52	2.34	1.09	14.4	30.8	21.1
	JM22	36.16	2.25	1.05	15.9	34.4	23.6
	WM8	33.52	2.28	1.06	14.9	31.8	21.6
2013	HS4399	33.71	2.81	1.23	13.6	27.4	17.7
	JM22	36.09	2.40	1.12	14.9	32.2	22.2
	WM8	34.45	2.46	1.13	14.5	30.6	20.6
均值	HS4399	32.33c	2.35a	1.10a	13.5b	29.5c	20.6c
	JM22	35.43a	2.23a	1.06a	15.2a	33.5a	23.5a
	WM8	33.63b	2.26a	1.07a	14.4ab	31.6b	22.0b

注:不同的小写字母表示不同品种间差异显著( $P < 0.05$ )。

光合功能期之间存在差异<sup>[7]</sup>。Fang等<sup>[8]</sup>研究表明,高密度、干旱条件下后期叶片衰老加快而导致粒重降低。本研究表明,超晚播栽培下由于基本苗多、群体大,不同品种花后冠层光截获率均处于高水平。但由于品种的叶型和穗型不同,在相近的群体下冠层内部光分布不同,大穗型品种上部叶片大、截获光能多,但中下部叶受光不良;小穗型品种叶片小,后期随着叶片衰亡群体光截获率会迅速下降。济麦22的穗、叶型中等,叶片直立性好,其相对于维麦8号和衡水4399能更持久地维持较高的光截获率。特别是在灌浆后期济麦22仍具有较高的旗叶SPAD值、较高的气孔导度和灌浆速率,同时蒸腾速率也较低,表明其叶片光合功能和水分利用效率也较强。因此,灌浆后期较长的叶片持绿性和较高的功能活性是济麦22获得较高粒重的生理基础。

粒重高低既受源功能调节,也受籽粒本身库活性的调控<sup>[9]</sup>。研究表明,籽粒灌浆速率主要受品种自身遗传因素影响,而籽粒灌浆时间除受品种影响外,环境因素也起很大作用<sup>[10]</sup>。有研究表明,粒重与灌浆速率正相关<sup>[11]</sup>;也有研究表明,粒重与灌浆时间正相关,而与灌浆速率没有明显相关性<sup>[12]</sup>;或者粒重受灌浆时间和灌浆速率共同制约<sup>[11]</sup>。本研究中,尽管3个品种最大灌浆速率和平均灌浆速率相似,但济麦22灌浆期最长,特别是活跃灌浆期最长,最大灌浆速率出现的时间最晚;维麦8号次之,而衡水4399灌浆持续期最短。此外,本研究还发现济麦22在灌浆后期仍具有较高的灌浆速率,这与其灌浆后期较高的辐射截获率、SPAD值和光合速率是相吻合的。这说明,超晚播限水条件下济麦22后期群体辐射截获率高、叶片功能期较长、光合速率高,延长了灌浆持续期特别是活跃灌浆期,且后期灌浆速率降低慢,从而增加了

物质积累和千粒重,进而获得了最高的产量。因此,在上述3种类型品种中,叶型和穗型中等的品种济麦22更适合于限水灌溉下的超晚播高产栽培。

#### 参考文献(References)

- [1] Sun H Y, Zhang X Y, Wang E L, et al. Quantifying the impact of irrigation on groundwater reserve and crop production: A case study in the North China Plain[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70(1): 48-56.
- [2] Zhang Y P, Zhang Y H, Wang Z M, et al. Characteristics of canopy structure and contributions of non-leaf organs to yield in winter wheat under different irrigated conditions[J]. *Field Crops Research*, 2011, 123(3): 187-195.
- [3] Li Q Y, Yin J, Liu W D, et al. Determination of optimum growing degree-days (GDD) range before winter for wheat cultivars with different growth characteristics in North China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(3): 405-415.
- [4] 王志敏, 王璞, 李绪厚, 等. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术[J]. *中国农业科技导报*, 2006, 8(5): 38-44.  
Wang Zhimin, Wang Pu, Li Xuhou, et al. Principle and technology of water-saving, fertilizer-saving, high-yielding and simple cultivation in winter wheat[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2006, 8(5): 38-44.
- [5] Wang B, Zhang Y H, Hao B Z, et al. Grain yield and water use efficiency in extremely-late sown winter wheat cultivars under two irrigation regimes in the north China plain[J]. *PLoS One*, 2016, 11(4): e0153695.
- [6] Sun H, Shao L, Chen S, et al. Effects of sowing time and rate on crop growth and radiation use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. *Industrial Crops & Products*, 2013, 7(2): 117-138.
- [7] Lu D, Lu F, Pan J, et al. The effects of cultivar and nitrogen management on wheat yield and nitrogen use efficiency in the North China

- Plain [J]. *Field Crops Research*, 2014(17): 157-164.
- [8] Fang Y, Xu B C, Turner N C, et al. Grain yield dry matter accumulation and remobilization and root respiration in winter wheat as affected by seeding rate and root pruning[J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33(4): 257-266.
- [9] 王瑞霞, 张秀英, 伍玲, 等. 不同生态环境条件下小麦籽粒灌浆速率及千粒重QTL分析[J]. *作物学报*, 2008, 34(10): 1750-1756.  
Wang Ruixia, Zhang Xiuying, Wu Ling, et al. QTL mapping for grain filling rate and thousand-grain weight in different ecological environments in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(10): 1750-1756.
- [10] 冯素伟, 胡铁柱, 李淦, 等. 不同小麦品种籽粒灌浆特性分析[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(4): 643-646.
- Feng Suwei, Hu Tiezhu Li Gan, et al. Analysis on grain filling characteristics of different wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(4): 643-646.
- [11] 翟利剑. 春小麦群体库的形成及其特性分析[J]. *麦类作物学报*, 2003, 23(2): 60-64.  
Zhai Lijian. Formation and characteristics of population sink in spring wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(2): 60-64.
- [12] Genty B, Briantais J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1989, 990(1): 87-92.

## Characteristics of photosynthesis and grain-filling of various winter wheat cultivars under extremely-late sown and water-saving cultivation conditions

WANG Bin, ZHANG Meng, CHEN Jingtian, ZHANG Yinghua, HUANG Qin, WANG Zhimin

College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China

**Abstract** To select a suitable winter wheat cultivar under extremely-late sown and limited irrigation conditions in the heilonggang region, a 3 year field experiment is conducted using three cultivars varying in spike types: the large spike cultivar Weimai 8, the small spike cultivar Hengshui4399, and the medium spike cultivar Jimai 22. Characteristics of photosynthesis post-anthesis and dynamic of grain-filling are investigated for these extremely-late sown wheat cultivars. Results show that the yield differences among the cultivars are mainly due to the differences in the 1000 grain weight (TGW), with the Jimai 22 having the highest TGW and yield. Comparing with the Weimai 8 and the Hengshui 4399, the higher TGW of the Jimai 22 comes largely from the longer grain-filling period, especially, the active grain-filling period, and the higher grain-filling rate in the late grain-filling stages, closely associated with the higher light interception rate and photosynthetic rate. Thus, the medium spike cultivar Jimia 22 is a suitable cultivar under extremely-late sown and limited irrigation conditions in the heilonggang region.

**Keywords** winter wheat; cultivars; 1000-grain weight; photosynthesis; grain-filling

(责任编辑 傅雪)