

迟播早熟高产小麦新品种的培育

高德荣^{1,2}, 王慧¹, 刘巧¹, 朱冬梅¹, 张晓¹, 吕国锋¹, 张晓祥¹, 江伟¹, 李曼¹

(¹江苏里下河地区农业科学研究所/农业部长江中下游小麦生物学与遗传育种重点实验室, 江苏扬州 225007; ²扬州大学/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏扬州 225009)

摘要:【目的】研究小麦品种(系)播种-拔节和开花-成熟 2 个阶段发育特性, 探讨在育种中聚合两端快速发育特性的可能性, 为长江中下游麦区选育迟播早熟高产品种提供依据。【方法】在 2012—2013 和 2013—2014 年, 通过比较共计 18 个小麦新品系及生产上部分推广品种的冬前及越冬期单株叶片数、茎蘖数, 将粒灌浆特性相关指标等, 筛选具有两端快速发育特性的品种(系); 2014—2015 年, 在适期播种(11 月 5 日)和迟播(11 月 19 日)条件下, 研究扬麦 16 和其他 4 个品种不同生育时期群体结构(茎蘖数、叶面积指数、干物质积累量)和产量及其构成的差异, 分析具有两端快速发育特性品种扬麦 16 迟播高产的生长发育机理。【结果】2012—2013 年, 富 F101 冬前及越冬期叶片数、茎蘖数均较高, 显著高于镇 10216, 具有前端快速发育特征, 但后期灌浆速率较慢; 宁 09-118 和镇 10216 最大灌浆速率、平均灌浆速率较高, 灌浆持续时间长, 粒重显著高于其他品种, 具有后端快速发育特征, 但前期生长发育较慢。2013—2014 年, 富 F101 冬前及越冬期茎蘖数均表现较高, 镇 10216 最大灌浆速率、平均灌浆速率均最高, 理论粒重最大, 2 个品系继续分别表现出前端和后端快速发育特性; 扬麦 16 冬前茎蘖数高于富 F101, 越冬期茎蘖数与富 F101 无显著差异; 后期最大灌浆速率大于 2.0 mg/(粒·d), 与镇 10216 差异不显著, 且平均灌浆速率较高, 较好地结合了两端快速发育的特性。2014—2015 年, 迟播条件下, 扬麦 16 越冬期茎蘖数、叶面积指数及干物质积累量均表现最大, 显著高于宁麦 13; 在适期播种条件下, 扬麦 16 产量低于扬麦 22, 与扬麦 20、扬麦 23 和宁麦 13 差异不显著, 但在迟播条件下产量显著高于扬麦 20、宁麦 13, 与扬麦 22、扬麦 23 无显著差异, 与适期播种相比减产幅度最小, 减产 5.2%, 千粒重高而稳定, 达 40 g 以上。【结论】品种间两端快速发育特性存在显著差异, 结合两端快速发育特性的品种能够实现迟播高产, 同时保证适期播种取得较高产量。扬麦 16 冬前生长发育快, 越冬期能保持一定生长量及分蘖发生量; 快速灌浆持续时间长, 平均灌浆速率、峰值灌浆速率大, 粒重高; 迟播早熟高产, 这是其大面积推广的重要原因。

关键词: 小麦; 育种; 迟播; 早熟; 产量

Breeding of New Wheat Varieties with Early Maturity and High Yield Under Late Sowing

GAO DeRong^{1,2}, WANG Hui¹, LIU Qiao¹, ZHU DongMei¹, ZHANG Xiao¹, LÜ GuoFeng¹,
ZHANG XiaoXiang¹, JIANG Wei¹, LI Man¹

(¹Lixiahe Institute of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Breeding in the Middle and Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture, Yangzhou 225007, Jiangsu; ²Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu)

Abstract: 【Objective】The objectives of this study were to investigate the growth characteristics during the period from sowing to elongation and from anthesis to maturity in wheat cultivars (varieties), and to explore the possibility of breeding new cultivars with

收稿日期: 2019-03-07; 接受日期: 2019-05-05

基金项目: 国家重点研发计划(YFD0100800)、农业部现代农业产业技术体系建设专项(CARS-3-2-11)

联系方式: 高德荣, E-mail: gdr@wheat.org.cn. 王慧, E-mail: wh@wheat.org.cn. 高德荣和王慧为同等贡献作者

the feature of rapid growth at both early and late stages to achieve high yield and early maturity under late sowing condition in the middle and lower reaches of the Yangtze river. 【Method】 In the seasons of 2012–2013 and 2013–2014, experiments were conducted to compare leaf number, stem and tiller number and the parameters of grain filling among 18 new wheat lines and cultivars for screening the cultivar with rapid development at both early and late growth stages. In the season of 2014–2015, the differences of stem and tiller number, leaf area index (LAI), dry matter accumulation, yield and yield components were analyzed among Yangmai 16 and other 4 cultivars under the conditions of the normal (5th Nov.) and late (19th Nov.) sowing time to clarify the growth mechanics of high-yield about Yangmai 16 with rapid development at both early and late growth stages under late-sowing treatment.

【Result】 Fu F101 showed a rapid development at early growth stage with a significantly higher number of leaves and tillers (before winter and during winter period) than Zhen 10216 in the 2012–2013, Ning 09-118 and Zhen 10216 had longer grain filling and rapid development at late growth stage with higher maximum grain filling rate (G_{\max}) and mean grain filling rate (G_{mean}) thus higher grain weight than other cultivars. The 2013–2014 trial showed similar results with Fu F101 performing rapid development at early stage and Zhen 10216 at late stage. Yangmai 16 produced even more tillers than Fu F101 before winter and similar tillers to Fu F101 during winter period. Meanwhile, both G_{mean} and G_{\max} of Yangmai 16 were similar to Zhen 10216 with G_{\max} being more than 2.0 mg/(grain·d). LAI, stem and tiller number and dry matter accumulation of Yangmai 16 in winter period were significantly higher than Ningmai 13 and other cultivars. In 2014–2015 trial, the yield of Yangmai 16 was lower than Yangmai 22 and similar to Yangmai 20, Yangmai 23 and Ningmai 13 under normal sowing time. However, under late sowing, the yield of Yangmai 16 was significantly higher than Yangmai 20 and Ningmai 13 and had the lowest yield reduction (5.2%) compared to other cultivars. 【Conclusion】 Significant differences were found among varieties in the rate of development at early and late growth stages. The rapid development at both early and late stages of Yangmai 16 makes it an excellent variety with not only a reasonable yield under normal sowing date but minimum yield reduction under late sowing. In summary, rapid development at both early and late stages can be used as a key criterion for selecting wheat varieties suitable for late sowing.

Key words: wheat; breeding; late sowing; early maturing; grain yield

0 引言

【研究意义】长江中下游麦区是中国第二大麦区,也是最大的稻麦两熟区,稻麦总产量约占全国 1/3。江苏是中国稻茬小麦主要产区之一,小麦年种植面积 $220 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 左右,其中 73% 稻茬麦,占全国稻茬麦面积的 44.3%^[1]。近年来,该地区稻茬小麦播期由适宜期 10 月 25 日至 11 月 5 日推迟至 11 月下旬,甚至 12 月,据统计,2015、2016 和 2017 年江苏省迟播小麦比例分别达到 48.6%、51.2% 和 59.6%^[2]。扬州市机插秧多在 11 月 3—8 日收获,直播稻多在 11 月 7—15 日收获,常导致小麦播种期超出最适播期的下限值^[3];南通市 2015 年秋播适期播种面积仅占比 43%,至 12 月 10 日结束,播期跨度历时 45 d^[2]。江苏稻茬小麦迟播已成常态,迟播成为制约江苏小麦增产的关键因素之一。王龙俊等^[4]指出迟播小麦每迟播 7 d,单产将减少 7%—10%,比适期播种的小麦平均产量低 750—900 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小麦播期推迟主要有 3 个方面原因:一是为了提高水稻种植效益,迟熟粳稻面积逐年扩大,水稻机插和直播技术广泛应用,造成水稻收获期不断推迟;二是规模种植条件下机械、烘干等配套设施无法满足水稻适时收割;三是小麦机械播种对土壤墒情要求较

高,而长江中下游地区秋播雨水偏多,造成土壤墒情无法满足小麦正常播种及出苗的需要。迟播对小麦生育期、农艺性状、产量及其构成、品质性状均有显著影响^[5-7]。迟播使小麦越冬前生长期缩短,分蘖发生迟,难以形成足穗大穗;开花期延迟 3—5 d,籽粒灌浆时间缩短,充实度差。因此,迫切需要耐迟播早熟小麦品种,以解决当前生产上面临的迟播问题和满足稻麦周年增产的需求。【前人研究进展】关于迟播对小麦生长发育及产量的影响,前人进行了大量研究。小麦迟播后,由于气温下降,出苗推迟^[8],有效分蘖期变短,适期播种小麦越冬期叶龄一般为 4—5 叶,而迟播小麦越冬期叶龄只有 2 叶左右,冬前分蘖较少或基本上无分蘖,群体不足,次生根少,养分积累不足,难以形成壮苗^[9-11],不利于小麦叶面积指数^[12-13]和叶片光合性能的提高^[14],也造成群体干物质积累量减少,同时主茎分化总叶数、低节位有效分蘖数减少,单穗粒数少,粒重低,进而影响小麦产量^[15-17]。为了缓解迟播对产量造成的损失,通常采用提高种植密度来弥补^[18-19],有研究还提出了迟播小麦独秆栽培技术,依靠足够多的主茎成穗减少产量损失^[20]。KIBE 等^[21]认为,迟播小麦增加拔节孕穗肥用量,能达到加强穗分化发育、减少退化,提高结实率及籽粒充实度的作

用, 对增粒增重十分重要^[4]。这种只强调前期增大群体或只强调后期水肥管理的生产措施均存在明显的弊端, 可能加重病害发生或推迟成熟期。迟播最大的不利效应是不能在冬前形成较多分蘖, 影响成穗数; 迟播后拔节期不会同等程度推迟, 缩短了播种-拔节的生育时期, 而顶小穗分化的完成与拔节期同步, 造成穗分化时间短, 不能形成大穗^[22]。这就要求品种在迟播情况下前期生长发育快, 在冬前和越冬期形成较多分蘖, 越冬期具有一定的生长发育, 奠定大穗足穗的基础。拔节-开花阶段是干物质积累最快的时期, 也是节间生长和株高决定期, 这一阶段的生长发育过快或生长期过短, 会造成茎秆质量差, 生物学产量较低, 不利于形成高产基础。开花-成熟阶段为籽粒灌浆期, 迟播造成开花推迟, 灌浆期缩短, 这就要求品种灌浆快, 用灌浆速度的提高补偿灌浆期缩短的不利效应, 保证较高粒重。【本研究切入点】虽然通过栽培措施能在一定程度上减少迟播对小麦产量的不利影响, 但选育耐迟播小麦品种才是解决迟播问题的最重要途径, 如何调整小麦前端(播种-拔节)与后端(开花-成熟)生育进程, 培育两端快速发育的耐迟播品种并实现迟播早熟高产鲜见系统研究。【拟解决的关键问题】本研究以不同小麦基因型为材料, 筛选具有两端快速发育特性的小麦品种, 探讨其实现迟播早熟高产的机制, 为长江中下游麦区耐迟播小麦品种选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2012—2013、2013—2014 和 2014—2015 年在江苏里下河地区农业科学研究所试验基地(32°42'E, 119°53'N)进行, 试验地前茬为水稻, 土壤为砂壤土, 土壤有机质含量 16.57 g·kg⁻¹, 全氮含量 1.035 g·kg⁻¹, 全磷含量 0.461 g·kg⁻¹, 速效氮含量 61.28 mg·kg⁻¹, 速效磷含量 18.2 mg·kg⁻¹, 速效钾含量 77.8 mg·kg⁻¹。试验施纯氮 210 kg·hm⁻², 基肥: 壮蘖肥: 拔节肥=5:1:4, 基肥于播种前一天施用, 壮蘖肥于 4 叶期施用, 拔节肥于叶龄余数 2.5 叶期施用。P、K 肥施用量均为 105 kg·hm⁻², 全部基施。其他栽培措施同大田生产。

1.2 试验设计

试验一: 2012—2013 年以江苏省育成的新品系为供试材料, 分别为华麦鉴 3、宁 09-118、宁 0944、金麦 1 号、扬 09-111、宁 09-72、扬 09G143、镇 10216、

宁丰 526、富 F101、宁 0898、扬 09-130 及华麦 0480, 扬麦 11 作对照。采用随机区组设计, 播期 11 月 5 日, 基本苗 240×10⁴ 株/hm², 小区面积 6.67 m², 2 次重复。

试验二: 2013—2014 年选择上一年度苗期生长发育快的品系富 F101, 后期灌浆快的品系镇 10216 为对照, 生产上大面积应用品种扬麦 158、扬麦 16、扬麦 11、扬麦 15 为供试材料。采用随机区组设计, 播期 11 月 5 日, 基本苗 240×10⁴ 株/hm², 小区面积 6.67 m², 2 次重复。

试验三: 2014—2015 年选用结合两端快速发育特性的品种扬麦 16 和生产上推广品种扬麦 20(长江中下游麦区区域试验对照品种)、扬麦 22、扬麦 23、宁麦 13 为供试品种。采用两因素随机区组设计, 以品种为主区, 设 2 个播期 11 月 5 日(适播)和 11 月 19 日(迟播), 基本苗分别为 240×10⁴ 株/hm²和 300×10⁴ 株/hm²。人工条播, 行距 22 cm, 小区面积 6.67 m², 3 叶期进行人工定苗, 3 次重复。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎蘖动态、叶面积指数和干物重调查 2012—2013 年调查各品系冬前叶片数、茎蘖数(12 月 20 日调查)和越冬期叶片数、茎蘖数(1 月 20 日调查), 每小区调查 20 株; 2013—2014 年调查各品种冬前、越冬期茎蘖数, 每小区调查 20 株; 2014—2015 年于越冬期、拔节期、孕穗期、开花期、成熟期分别在每小区取样 20 株, 调查各品种茎蘖数, 用美国产叶面积仪(LI-3000C)测定叶面积, 叶面积指数为单位土地面积上所有绿叶面积之和与占土地面积的比值。样品在 105℃杀青 60 min, 而后 80℃烘干至恒重, 测定干物重。

1.3.2 产量及其构成因素调查 2014—2015 年小麦成熟期调查单位面积有效穗数、每穗粒数及千粒重(水分 13%)。每小区机械收割, 自然晾晒, 测定产量。

1.3.3 灌浆速率测定 2012—2013 和 2013—2014 年, 于小麦初花期, 每小区选择同一天开花, 且穗长相、长势和大小基本一致、无病虫害的单茎 120 个挂牌标记, 从花后 10 d 开始取样, 以后每隔 5 d 取样, 直至完全成熟。每次取 10 个标记的穗子, 单穗手工脱粒后 105℃杀青 30 min, 后 80℃烘至恒重, 称重并计粒数。灌浆速率用每粒每天增长量表示, 单位 mg/(粒·d)。

1.4 数据统计与分析

用 Logistic 方程 $W=K/(1+e^{A+Bt})$ ^[23]对籽粒增重进程进行拟合, 式中 t 为开花后时间, W 为该时间

点相应的千籽粒干重， A 、 B 为方程对不同品种所确定的参数， K (mg/粒) 为拟合理论最高粒质量， e 指自然对数函数的底数。对方程一阶求导，可得籽粒灌浆速率方程，并可得到以下籽粒灌浆特征参数：籽粒生长起始势 $C_0=W_0/(1+e^A)$ ；籽粒最大灌浆速率出现时间 $T_{\max}(d)=-A/B$ ；最大灌浆速率 $R_{\max}(mg/(粒 \cdot d))=-KB/4$ ；灌浆持续时间 $T(d)$ ；籽粒平均灌浆速率 $R_{\text{mean}}(mg/(粒 \cdot d))=\text{籽粒增重}/\text{灌浆持续时间}$ 。灌浆速率曲线具有 2 个拐点，对灌浆速率方程一阶求导，可得 2 个拐点在 t 坐标上的值 t_1 和 t_2 ；令 t_3 为达到 96% W_0 时的时间，可得到灌浆过程的 3 个阶段，依次是灌浆渐增期 (T_1)、灌浆快增期 (T_2) 和灌浆缓增期 (T_3)，各阶段籽粒增加的质量分别为 W_1 、 W_2 和 W_3 ，对应的灌浆速率分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 。用

Microsoft Excel 2003 统计试验结果，用 SPSS19.0 软件进行显著性检验和方差分析，在 DPS6.55 中作 Logistic 方程拟合。

2 结果

2.1 不同品系冬前、越冬期生长特性差异

2012—2013 年不同品系间冬前叶片数、茎蘖数和越冬期叶片数、茎蘖数均存在显著或极显著差异 (表 1)。富 F101、金麦 1 号冬前叶片数最多，镇 10216 最少；冬前茎蘖数以富 F101 最高，显著高于扬 09G143、镇 10216，但都与扬麦 11 无显著差异。越冬期叶片数、茎蘖数均以镇 10216 最少，显著低于富 F101 等品种。表明富 F101 具有前端快速发育特征，而扬 09G143、镇 10216 前端发育较慢。

表 1 试验一不同品系冬前和越冬期单株叶片数及茎蘖数 (2012—2013)
Table 1 Leaf number, stem and tiller number per plant at pre-wintering and wintering stage of different varieties in the experiment 1 (2012–2013)

品系 Variety	冬前 Pre-wintering		越冬期 Wintering stage	
	单株叶片数	单株茎蘖数	单株叶片数	单株茎蘖数
	Leaf number per plant	Stem and tiller number per plant	Leaf number per plant	Stem and tiller number per plant
华麦鉴 3 Huamai J3	3.4ab	1.3b	4.4ab	2.7ab
宁 09-118 Ning 09-118	3.3abc	1.8ab	4.2abc	2.8a
宁 0944 Ning 0944	3.4ab	1.5ab	4.3abc	2.9a
金麦 1 号 Jinmai 1	3.5a	1.5ab	4.5a	2.0c
扬 09-111 Yang 09-111	3.2abc	1.3b	4.0bc	2.4abc
宁 09-72 Ning 09-72	3.4ab	1.6ab	4.3abc	2.3abc
扬 09G143 Yang 09G143	3.2abc	1.2b	4.1abc	2.1bc
镇 10216 Zhen 10216	3.0c	1.2b	3.8c	2.0c
宁丰 526 NF 526	3.1bc	1.3b	4.0bc	2.0c
富 F101 Fu F101	3.5a	2.1a	4.3abc	2.7ab
宁 0898 Ning 0898	3.4ab	1.7ab	4.1abc	2.5abc
扬 09-130 Yang 09-130	3.2abc	1.6ab	4.0bc	2.5abc
华麦 0480 Huamai 0480	3.4ab	1.5ab	4.2abc	2.6abc
扬麦 11 Yangmai 11	3.4ab	1.7ab	4.2abc	2.7ab

同列数据后的不同小写字母代表处理间在 5%水平差异显著。下同
Different small letters in the same column indicate significant differences among the treatments at 0.05 level. The same as below

2013—2014 年不同品种间冬前和越冬期茎蘖数差异显著 (表 2)。富 F101 冬前茎蘖数、越冬期茎蘖数均显著高于扬 09G143、镇 10216。各主栽品种中，扬麦 16 冬前茎蘖数比富 F101 高 7.1%，显著高于扬 09G143、镇 10216 及扬麦 15，与其他主栽品种差异不

显著；各主栽品种越冬期茎蘖数与富 F101 无显著差异，扬麦 16、宁麦 13 越冬期茎蘖数显著高于扬 09G143。表明主栽品种扬麦 16、扬麦 11、扬麦 158、宁麦 13 与富 F101 相似，都具有前端快速发育特征，而扬麦 15 与扬 09G143 相似，前端发育较慢。

表 2 试验二不同品种间冬前和越冬期单株茎蘖数（2013—2014）

Table 2 Stem and tiller number per plant at pre-wintering and wintering stage of different wheat cultivars in the experiment 2 (2013–2014)

品种 Cultivar	单株茎蘖数 Stem and tiller number per plant	
	冬前 Pre-wintering	越冬期 Wintering stage
扬 09G143 Yang 09G143	2.3c	4.0ab
镇 10216 Zhen 10216	2.4bc	3.8b
富 F101 Fu F101	2.8ab	4.6a
扬麦 15 Yangmai 15	2.4bc	3.9ab
扬麦 158 Yangmai 158	2.6abc	4.1ab
扬麦 11 Yangmai 11	2.6abc	4.3ab
宁麦 13 Ningmai 13	2.7abc	4.5a
扬麦 16 Yangmai 16	3.0a	4.5a

表 3 试验一不同品系籽粒灌浆的 Logistic 方程参数（2012—2013）

Table 3 Parameters of logistics equation of grain filling process in different varieties in the experiment 1 (2012–2013)

品系 Variety	R^2	K	A	B	C_0	R_{\max}	R_{mean}	R1	R2	R3	T	T_{\max}
华麦叁 3 Huamai J3	0.997	45.2b	4.42	-0.21	0.51	2.22abc	1.17abc	0.60a	1.94abc	0.82abc	36.1abc	21.0ab
宁 09-118 Ning 09-118	0.992	44.1bc	4.79	-0.24	0.37	2.65a	1.33a	0.65a	2.33a	0.98a	33.1cd	19.9b
宁 0944 Ning 0944	0.999	39.4cde	4.47	-0.21	0.45	2.01abc	1.05cd	0.54a	1.76abc	0.74abc	37.6ab	21.9ab
金麦 1 号 Jinmai 1	0.994	31.7f	3.59	-0.21	0.90	1.63c	0.96d	0.61a	1.43c	0.60c	31.4d	17.5c
扬 09-111 Yang 09-111	0.996	35.8ef	3.99	-0.22	0.78	1.91bc	1.07cd	0.53a	1.67bc	0.71bc	33.6bcd	16.9c
宁 09-72 Ning 09-72	0.999	40.5bcde	4.03	-0.19	0.71	1.92bc	1.07cd	0.60a	1.68bc	0.71bc	38.1a	21.3ab
扬 09G143 Yang 09G143	0.997	40.2bcde	3.97	-0.18	0.74	1.82bc	1.02cd	0.58a	1.59bc	0.67bc	39.7a	22.0ab
镇 10216 Zhen 10216	0.996	51.2a	4.21	-0.19	0.76	2.38ab	1.30ab	0.70a	2.09ab	0.88ab	39.7a	22.6a
宁丰 526 NF 526	0.997	42.9bc	4.62	-0.22	0.47	2.30ab	1.18abc	0.59a	2.02ab	0.85ab	39.0a	21.6ab
富 F101 Fu F101	0.996	42.7bcd	4.37	-0.20	0.56	2.11abc	1.12bcd	0.58a	1.85abc	0.78abc	38.4a	22.2a
宁 0898 Ning 0898	0.991	40.6bcde	3.88	-0.21	0.87	1.99abc	1.13bcd	0.59a	1.75bc	0.73abc	36.1abc	20.9ab
扬 09-130 Yang 09-130	0.999	37.4de	4.04	-0.19	0.66	1.74bc	0.97d	0.54a	1.52bc	0.64bc	36.9abc	21.8ab
华麦 0480 Huamai 0480	0.997	43.3bc	4.63	-0.22	0.42	2.32ab	1.19abc	0.59a	2.04ab	0.86ab	36.5abc	21.6ab
扬麦 11 Yangmai 11	0.998	45.2b	4.18	-0.20	0.69	2.17abc	1.18abc	0.64a	1.91abc	0.80abc	38.3a	21.8ab

R^2 : 拟合系数; K: 理论粒重 (mg/粒); A 和 B: Logistic 方程 $W = K / (1 + e^{A+Bt})$ 的回归参数; C_0 : 籽粒生长起始势; R_{\max} : 最大灌浆速率 (mg/(粒·d)); R_{mean} : 平均灌浆速率 (mg/(粒·d)); R1: 灌浆渐增期灌浆速率 (mg/(粒·d)); R2: 灌浆快增期灌浆速率 (mg/(粒·d)); R3: 灌浆缓增期灌浆速率 (mg/(粒·d)); T: 灌浆持续时间 (d); T_{\max} : 籽粒最大灌浆速率出现时间 (d)。下同

R^2 : Fitting coefficient; K: Theoretical grain weight(mg/grain); A and B: Parameters in logistic equation $W = K / (1 + e^{A+Bt})$; C_0 : Initial grain-filling potential; R_{\max} : Maximum grain-filling rate (mg/(grain·d)); R_{mean} : Mean grain filling rate (mg/(grain·d)); R1: Grain-filling rate in grain-filling pyramid period (mg/(grain·d)); R2: Grain-filling rate in Grain-filling fast increase period (mg/(grain·d)); R3: Grain-filling rate in Grain-filling slowly increase period (mg/(grain·d)); T: Grain-filling time(d); T_{\max} : Days reaching the maximum grain-filling rate(d). The same as below

2.2 灌浆特性差异

对 2012—2013 年和 2013—2014 年不同品种开花后籽粒灌浆进程用 Logistic 方程分别进行拟合（表 3 和表 4）。拟合系数范围分别在 0.991—0.999 和 0.997—0.999，说明该方程描述的曲线可反映不同品种小麦籽粒灌浆进程。2012—2013 年宁 09-118 的最大灌浆速率最高，达到 2.7 mg/(粒·d)，其次为镇 10216，达到 2.4 mg/(粒·d)，但所有品系与扬麦 11 都没有显著差异。宁 09-118 的平均灌浆速率最大，其次为镇 10216，均达 1.3 mg/(粒·d)，显著高于宁 0944、金麦 1 号、扬 09-111、扬 09G143 等品种。灌浆持续时间及达到最大灌浆速率时间以镇 10216 最长，理论粒重达 51 g，显著高于其他品系。镇 10216 最大灌浆速率、平均灌浆速率较高，灌浆持续时间长，灌浆较充分，粒重最高，表明宁 09-118 和镇 10216 等具有后端快速发育特征，扬 09G143 和富 F101 后端发育较慢。

2013—2014 年度各品种间籽粒最大灌浆速率、平均灌浆速率存在显著差异（表 4）。镇 10216 最大灌浆速率、渐增期灌浆速率、快增期灌浆速率、缓增期灌浆速率以及平均灌浆速率均最高，灌浆持续时间长，理论粒重最高，扬 09G143、富 F101 最大灌浆速率、平均灌浆速率显著低于镇 10216，理论粒重分别比镇 10216 低 31.91%、19.57%。扬麦 16、扬麦 11、扬麦 158 的最大灌浆速率均在 2.0 mg/(粒·d)以上，与镇 10216 无显著差异，平均灌浆速率在 1.2 mg/(粒·d)左右；扬麦 15、宁麦 13 最大灌浆速率、平均灌浆速率与富 F101 接近，显著低于镇 10216。表明扬麦 11、扬麦 16、扬麦 158 与镇 10216

都具有后端快速发育的特征，而宁麦 13 和扬麦 15 灌浆较慢。

表 5 表明，理论粒重、实际粒重与灌浆特征参数的相关性趋势一致，粒重与最大灌浆速率、平均灌浆速率、渐增期灌浆速率、快增期灌浆速率、缓增期灌浆速率均呈极显著正相关，表明小麦平均灌浆速率、最大灌浆速率、渐增期、快增期及缓增期的灌浆速度越快，粒重就越高。粒重与灌浆持续时间及最大灌浆速率出现时间相关性两年略有不同，2012—2013 年粒重与灌浆持续时间、最大灌浆速率出现时间呈显著或极显著正相关，2013—2014 年相关性不显著。

表 4 试验二不同品种籽粒灌浆的 Logistic 方程参数（2013—2014）

Table 4 Parameters of logistics equation of grain filling process in different cultivars in the experiment 2 (2013-2014)

品种 Cultivar	R^2	K	A	B	C_0	R_{\max}	R_{mean}	R1	R2	R3	T	T_{\max}
扬 09G143 Yang 09G143	0.998	41.4c	3.89	-0.17	0.83	1.76c	1.00e	0.58e	1.54c	0.65d	41.6bc	22.9b
镇 10216 Zhen 10216	0.997	60.8a	3.85	-0.15	1.28	2.33a	1.33a	0.78a	2.04a	0.86a	45.9a	25.1a
富 F101 Fu F101	0.999	48.9b	3.71	-0.16	1.18	1.90bc	1.10bcde	0.68bc	1.66bc	0.70bcd	44.4abc	23.9ab
扬麦 11 Yangmai 11	0.998	49.7b	3.88	-0.17	1.01	2.12ab	1.20b	0.70b	1.86ab	0.78abc	41.5bc	22.8b
扬麦 15 Yangmai 15	0.998	48.7b	3.82	-0.16	1.05	1.89bc	1.08cde	0.64cd	1.66bc	0.70cd	45.1ab	24.6ab
扬麦 16 Yangmai 16	0.997	49.5b	4.18	-0.18	0.73	2.17a	1.18bc	0.64cd	1.90a	0.80ab	40.4c	22.9b
扬麦 158 Yangmai 158	0.998	49.7b	4.00	-0.17	0.90	2.09ab	1.16bcd	0.66bc	1.83ab	0.77abc	42.7abc	23.8ab
宁麦 13 Ningmai 13	0.998	45.2bc	3.98	-0.17	0.84	1.89bc	1.06de	0.60de	1.65bc	0.69cd	42.9abc	23.9ab

表 5 灌浆参数与粒重的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between grain filling parameters and grain weight

年份 Year	粒重 Grain weight	R_{\max}	R_{mean}	R1	R2	R3	T	T_{\max}	K
2012—2013	理论值 Theoretical	0.79**	0.83**	0.69**	0.79**	0.79**	0.62*	0.68**	-
	实际值 Observed	0.84**	0.89**	0.71**	0.84**	0.84**	0.55*	0.62*	0.991**
2013—2014	理论值 Theoretical	0.88**	0.94**	0.95**	0.88**	0.88**	0.65	0.65	-
	实际值 Observed	0.84**	0.93**	0.98**	0.84**	0.85**	0.60	0.64	0.989**

*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著性
* and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels

2012—2013 和 2013—2014 两年研究表明，富 F101 虽然前端发育较快但后端发育慢，镇 10216 后端发育快但前端发育慢，它们都没能结合两端快速发育的特性；当前生产上的主体品种扬麦 16 较好地结合了两端快速发育的特性。

2.3 具有两端快速发育特性品种的群体结构及产量

2.3.1 茎蘖动态 适播条件下，扬麦 16 的越冬期茎蘖数显著高于宁麦 13，但与其他品种差异不显著；迟播条件下以扬麦 16 越冬期茎蘖数最多，其次为扬麦 23，均显著高于宁麦 13（表 6）。拔节期、

开花期和成熟期品种间的茎蘖数除扬麦 22 外都无显著差异，扬麦 22 作为多穗型品种其茎蘖数一直处于较高水平。扬麦 16 冬前分蘖多奠定了壮秆大穗的基础。

2.3.2 叶面积指数 适播条件下，扬麦 20 越冬期叶面积指数最大，其次为扬麦 16，均显著高于扬麦 22、宁麦 13；迟播条件下，扬麦 16 越冬期叶面积指数最大，与宁麦 13 差异达显著水平，拔节期和孕穗期与宁麦 13 差异不显著，开花期显著高于宁麦 13（表 7）。迟播小麦冬前有效积温低，苗小苗弱，营养生长不足，扬麦 16 迟播条件下较高的叶面积指

数能促进光合产物的积累，有利于壮苗的形成，而开花期较高的叶面积指数有利于后期的物质积累和籽粒灌浆。

2.3.3 干物质积累量 由表 8 可以看出，适播条件下，扬麦 16、扬麦 20 越冬期干物质积累量显著高于扬麦 22、宁麦 13；迟播条件下以扬麦 16 越冬期干物质积累量最高，显著高于扬麦 22、宁麦 13。2 个播期下，开花期和成熟期干物质积累量均以扬麦 22 最高，但扬麦 16 花后干物质积累量与扬麦 22 无显著差异。相关分析表明，花后干物质积累量与产量呈线性关系（ $y=0.8173x+2334.6$ ， $R=0.93^{**}$ ）。

表 6 播期对不同品种茎蘖数的影响（2014—2015）

Table 6 Effect of sowing date on stem and tiller number of different cultivars (2014–2015)

播期 Sowing date	品种 Cultivar	茎蘖数 Stem and tiller number (×10 ⁴ ·hm ⁻²)				
		越冬期 Wintering	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Anthesis	成熟期 Mature
11-05	扬麦 16 Yangmai 16	548ab	1107cd	680cd	442d	404c
	扬麦 20 Yangmai 20	599a	1197bc	697cd	481cd	426abc
	扬麦 22 Yangmai 22	485bc	1285ab	702cd	519bc	469ab
	扬麦 23 Yangmai 23	497bc	1127cd	633de	464cd	425abc
	宁麦 13 Ningmai 13	408cd	1061d	561e	489bcd	440abc
11-19	扬麦 16 Yangmai 16	485bc	1096cd	722bc	514bcd	415bc
	扬麦 20 Yangmai 20	439cd	1140cd	802ab	529bc	430abc
	扬麦 22 Yangmai 22	422cd	1353a	828a	610a	490a
	扬麦 23 Yangmai 23	479bc	1181c	664cd	516bc	440abc
	宁麦 13 Ningmai 13	373d	1124cd	630de	557ab	450abc

表 7 播期对不同品种叶面积指数的影响（2014—2015）

Table 7 Effect of sowing date on Leaf Area Index (LAI) of different cultivars (2014–2015)

播期 Sowing date	品种 Cultivar	叶面积指数 LAI			
		越冬期 Wintering	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Anthesis
11-05	扬麦 16 Yangmai 16	0.73a	4.0bcd	6.1bc	4.0cd
	扬麦 20 Yangmai 20	0.77a	4.1bcd	6.2bc	3.8de
	扬麦 22 Yangmai 22	0.57b	4.0bcd	6.5ab	4.3ab
	扬麦 23 Yangmai 23	0.71a	3.7cd	6.1bc	3.9cd
	宁麦 13 Ningmai 13	0.56b	3.5d	5.8c	3.6e
11-19	扬麦 16 Yangmai 16	0.42c	4.2abc	6.4ab	4.1bc
	扬麦 20 Yangmai 20	0.36cd	4.7a	6.5ab	4.1bc
	扬麦 22 Yangmai 22	0.32cd	4.3abc	6.9a	4.5a
	扬麦 23 Yangmai 23	0.41c	4.5ab	6.6ab	4.1bcd
	宁麦 13 Ningmai 13	0.28d	3.8cd	6.3abc	3.8de

表 8 播期对不同品种干物质积累量的影响（2014—2015）
Table 8 Effect of sowing date on the dry matter accumulation amount of different cultivars (2014-2015)

播期 Sowing date	品种 Cultivar	干物质积累量 Dry matter accumulation (kg·hm ⁻²)				
		越冬期 Wintering	拔节期 Jointing	开花期 Anthesis	成熟期 Maturity	花后 After anthesis
11-05	扬麦 16 Yangmai 16	469a	2923de	9382de	14921e	5539ab
	扬麦 20 Yangmai 20	474a	2757ef	9865cd	14893e	5029cde
	扬麦 22 Yangmai 22	364bc	2850def	10158c	15874cd	5716a
	扬麦 23 Yangmai 23	407ab	2699f	9759cde	15143de	5384abc
	宁麦 13 Ningmai 13	347bc	2756ef	9160e	14452e	5292abcd
11-19	扬麦 16 Yangmai 16	403ab	3382a	11491b	16565bc	5075bcde
	扬麦 20 Yangmai 20	361bc	3156bc	11413b	16089bc	4676e
	扬麦 22 Yangmai 22	314cd	3298ab	12614a	17951a	5337abcd
	扬麦 23 Yangmai 23	393abc	3352ab	12141a	16992b	4851de
	宁麦 13 Ningmai 13	256d	3015cd	11320b	15914cd	4594e

2.3.4 产量及其构成 表 9 表明，同一品种，播期推迟，通过增加播种量可以保持穗数不减少，但单穗粒数及千粒重均呈现下降趋势。迟播条件下，扬麦 16 单穗粒数与其他品种相比降幅最小；不同播期下均以扬麦 16 千粒重最高，且与其他品种差异显著，迟播千粒重下降最小，粒重比其他品种高 8.6%—13.9%。不同播期下扬麦 23 成熟期最早，迟播条件下，扬麦 16 成熟期与扬麦 23 相同。播期和品种对产量的影响均达极显著水平（分别为 $F=183.62^{**}$ 、 $F=18.15^{**}$ ）。同一品种，产量以适播最高。适播条件下产量以扬麦 22 最高，显著高出其他品种 4.3%—7.3%；扬麦 16 迟播产量与扬麦 22 无差异，显著高于扬麦 20、宁麦 13，较适播减产幅度最小，减产 5.2%。扬麦 16 在迟播条件下仍具有较高产量主要是由于其千粒重较高，在适播与迟播条件下均达 40 g 以上，迟播单穗粒数下降幅度最小。试验表明扬麦 16 较其他品种更耐迟播。

表 9 不同播期下试验品种的产量性状（2014—2015）
Table 9 The grain yield and its components of cultivars under different sowing dates during the 2014-2015 cropping season

播期 Sowing date	品种 Cultivar	穗数 Spike number ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	单穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000 grain weight (g)	产量 Grain yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	减产幅度 Decrease rate (%)	成熟期（月·日） Maturity (month-day)
11-05	扬麦 16 Yangmai 16	404c	46.2a	40.5a	6777b	—	5-26
	扬麦 20 Yangmai 20	426abc	46.3a	37.2c	6620bcd	—	5-26
	扬麦 22 Yangmai 22	469ab	44.2a	38.6b	7104a	—	5-25
	扬麦 23 Yangmai 23	425abc	47.4a	37.0cd	6811b	—	5-24
	宁麦 13 Ningmai 13	440abc	46.2a	36.6cd	6703bc	—	5-25
11-19	扬麦 16 Yangmai 16	415bc	44.1a	40.2a	6423cd	5.2	5-26
	扬麦 20 Yangmai 20	430abc	43.4a	37.0cd	6099e	8.3	5-30
	扬麦 22 Yangmai 22	490a	42.1a	35.3e	6456cd	10.3	5-29
	扬麦 23 Yangmai 23	440abc	44.5a	36.6d	6363de	6.6	5-26
	宁麦 13 Ningmai 13	450abc	43.4a	35.5e	6075e	9.8	5-30
F 值	播期 Sowing date(S)	2.2	12.5**	289.5**	183.6**		
F value	品种 Cultivars(C)	8.0**	1.5	500.2**	18.2**		
	播期×品种 S×C	0.12	0.06	71.03**	2.08		

3 讨论

3.1 播期推迟对阶段发育和籽粒灌浆的影响

中国冬播麦区随播期推迟, 气温不断降低, 迟播造成的不利影响非常严重, 不仅导致播种-出苗时间延长, 更严重推迟分蘖期。据史晓芳等^[24]研究, 播期推迟 20 d, 分蘖期推迟 33 d, 但拔节期只推迟 5 d, 抽穗期和开花期推迟 3 d, 成熟期仅 1 d 差异, 越冬期和返青期的茎蘖数、叶龄、叶面积指数和干物质积累量都低于适期播种。迟播后播种-拔节, 拔节-开花和开花-成熟 3 个阶段的生育期都会缩短, 其中受影响最大的是前期, 前期发育快有利于较早长成分蘖, 有利于小穗分化形成大穗, 但拔节不能早, 过早影响春季抗寒性和缩短穗分化时间; 其次受影响的是拔节-开花阶段, 这一阶段温度适宜, 小麦生长迅速, 群体自我调节能力强, 如果该阶段生长发育过快可能导致茎秆质量降低, 生育期过短也不利于干物质积累; 开花-成熟阶段就时间长短而言受影响最小, 迟播后开花期推迟有限、成熟期推迟幅度更小, 但缩短了灌浆的有利时期, 增加了对灌浆不利的后期高温时期, 对灌浆的影响较大。籽粒灌浆的适宜温度为 20—22℃, 高于 25℃灌浆加快, 叶内碳、氮和叶绿素含量下降, 叶片早衰, 灌浆期缩短^[19], 当小麦遇到 30℃以上热胁迫时, 抗氧化酶系统衰弱, 膜脂过氧化加剧, 植株早衰, 灌浆期缩短, 提早成熟^[25]。SHAH 等^[26]和 PLAUT 等^[27]认为花后高温降低籽粒干物质积累速率, 导致粒重降低。迟播小麦后期遇高温影响胚乳淀粉合成途径中的酶活性, 从而影响籽粒灌浆充实度, 最终导致减产^[28-29]。因此需要小麦品种前端发育快, 尽可能地在越冬前多长叶片和分蘖; 需要后端发育快, 即灌浆速度快, 避开高温危害风险, 用灌浆速度弥补灌浆期缩短的不利影响, 保持粒重高而稳定。安浩军等^[30]认为在生育性状的改良中, 缩短拔节到抽穗的时间, 不仅潜力高、弹性大、又不影响育成品种的越冬抗寒性和小穗分化, 而且对籽粒形成和灌浆更为有利。正常播种情况下这可能是提高品种产量的有效途径, 但在迟播条件下如果缩短拔节-抽穗或拔节-开花的时间, 势必造成生物学产量降低, 植株更加矮化, 不利于高产。

3.2 迟播条件下两端快速发育与产量

本研究结果表明, 不同品种(系)间冬前和越冬期茎蘖数均存在显著差异, 2012—2013 年富 F101 冬前及越冬期茎蘖数均较高, 具有前端快速发育特征;

镇 10216 最大灌浆速率、平均灌浆速率较高, 灌浆持续时间长, 灌浆较充分, 粒重显著高于其他品种, 具有后端快速发育特征。2013—2014 年扬麦 16 冬前茎蘖数高于富 F101, 越冬期茎蘖数与富 F101 无显著差异; 后期最大灌浆速率与镇 10216 差异不显著, 平均灌浆速率较高, 较好地结合了两端快速发育的特性。2014—2015 年, 扬麦 16 在迟播条件下越冬期茎蘖数最多, 叶面积指数最大, 干物质积累量最高, 产量与扬麦 22 无差异, 显著高于扬麦 20、宁麦 13, 较适播减产幅度最小, 且成熟期不推迟, 表明具有两端快速发育特性的品种能够实现迟播早熟高产。此后几年研究结果均表明, 扬麦 16 具有快速灌浆启动早, 峰值灌浆速率高, 平均灌浆速率大, 灌浆持续时间长, 千粒重高、熟期早的特点。适期播种扬麦 22 产量最高, 显著高于其他品种, 但迟播时与扬麦 16、扬麦 23 无显著差异, 且与适期播种相比减产幅度最大。试验结果显示迟播条件下其越冬期的茎蘖数、LAI 和花后干物质积累量与扬麦 16、扬麦 23 无显著差异, 但千粒重下降幅度最大, 而扬麦 16 和扬麦 23 千粒重几乎没有降低。后续研究表明, 扬麦 22 平均灌浆速率和峰值灌浆速率均小于扬麦 16, 峰值灌浆速率均低于 2 mg/(粒·d), 而扬麦 16 峰值灌浆速率都在 2 mg/(粒·d)以上。宁麦 13 迟播条件下越冬期的茎蘖数、LAI 和干物质积累量都最小, 虽然此后生长较快, 最终单位面积穗数并不少, 但由于是越冬后的分蘖成穗较多, 穗分化时间短, 不利于形成大穗, 迟播单穗粒数减少较多, 产量减小幅度较大。说明迟播条件下不具有两端快速发育特性的品种不利于获得高产。

根据多年的研究, 扬麦 16、扬麦 158、扬麦 11 和扬麦 23 等品种灌浆速率均较高, 它们的千粒重年度间都较为稳定, 产量较高, 先后成为生产主体品种。扬麦 11 和扬麦 16 均是以扬麦 158 为亲本选育的品种, 而扬麦 23 是以扬麦 16 为亲本选育的品种, 它们都保留了扬麦 158 灌浆快的特点。有研究认为品种间粒重差异主要是由灌浆速率不同引起的^[31-32], 而灌浆速率主要受遗传控制^[33-35]。任明全等^[36]研究了 12 个小麦品种的籽粒灌浆特性, 认为小麦籽粒灌浆速率在品种间存在显著的遗传差异, 并认为在育种中选择前中期籽粒灌浆速率较快的品系, 对育成高产稳产品种具有重要意义。研究还发现上述品种具有籽粒灌浆完成后脱水快的特点, 这些性状的遗传基础还有待进一步研究。

4 结论

品种间在冬前苗、冬前茎蘖数,越冬苗、越冬茎蘖数和籽粒灌浆特征参数等性状上都存在显著差异,通过强化这些性状的选择可以结合两端快速发育特性于一个品种,培育耐迟播早熟小麦品种,解决稻麦轮作区小麦迟播的问题,实现高产稳产。扬麦 16 等较好地结合了两端快速发育特性,该类型品种的推广有利于保障小麦迟播高产。

References

- [1] 张明伟. 稻茬晚播小麦群体与生理特征及密肥调控技术研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
ZHANG M W. Formation and physiological characteristics of high yielding population and regulation techniques with plant density and nitrogen application in late sowing wheat following rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018. (in Chinese)
- [2] 江苏省农业技术推广总站. 江苏省夏粮生产技术总结(2015、2016 和 2017 年).
Jiangsu Provincial Agricultural Technology Extension Station. Summary of summer grain production technology at Jiangsu province in 2015, 2016 and 2017. (in Chinese)
- [3] 葛胜, 童小云, 余媛. 晚茬小麦生育特性及高产栽培技术初探. 现代农业科学, 2009, 16(3): 89-90.
GE S, TONG X Y, YU Y. Late crop growth characteristics of wheat and of high yielding cultivation techniques. *Modern Agricultural Sciences*, 2009, 16(3): 89-90. (in Chinese)
- [4] 王龙俊, 陈维新, 郭文善, 朱新开. 晚茬小麦高产栽培技术途径. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 1999, 20(2): 44-48.
WANG L J, CHEN W X, GUO W S, ZHU X K. High yielding cultivation approaches in late-sown wheat. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 1999, 20(2): 44-48. (in Chinese)
- [5] 屈会娟, 李金才, 沈学善, 魏凤珍, 王成雨, 郅胜军. 种植密度和播期对冬小麦品种兰考矮早八干物质和氮素积累与转运的影响. 作物学报, 2009, 35(1): 124-131.
QU H J, LI J C, SHEN X S, WEI F Z, WANG C Y, ZHI S J. Effects of plant density and seeding date on accumulation and translocation of dry matter and nitrogen in winter wheat cultivar Lankao Aizao 8. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1): 124-131. (in Chinese)
- [6] 李筠, 王龙, 任立凯, 刘耀鸿, 曹卫星, 戴廷波. 播期、密度和氮肥运筹对冬小麦连麦 2 号产量和品质的调控. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 303-308.
LI J, WANG L, REN L K, LIU Y H, CAO W X, DAI T B. Effect of sowing date, density and nitrogen management on grain yield and quality of winter wheat Lianmai 2. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2): 303-308. (in Chinese)
- [7] 吴金芝, 黄明, 王志敏, 李友军, 付国占, 陈明灿. 极端晚播对小麦籽粒产量、氮素吸收利用和籽粒蛋白质含量的影响. 应用生态学报, 2018, 29(1): 185-192.
WU J Z, HUANG M, WANG Z M, LI Y J, FU G Z, CHEN M C. Effects of extremely-late sowing on the grain yield, nitrogen uptake and utilization, and grain protein content in winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 185-192. (in Chinese)
- [8] 张明明, 董宝娣, 乔匀周, 赵欢, 刘孟雨, 陈晏晏, 杨红, 郑鑫. 播期、播量对旱作小麦‘小偃 60’生长发育、产量及水分利用的影响. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1095-1102.
ZHANG M M, DONG B D, QIAO Y Z, ZHAO H, LIU M Y, CHEN Q Q, YANG H, ZHENG X. Effects of sowing date and seeding density on growth, yield and water use efficiency of ‘Xiaoyan 60’ wheat under rainfed condition. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(8): 1095-1102. (in Chinese)
- [9] 尚毅, 朱靖环, 华为, 汪军妹, 贾巧君, 杨建明. 南方冬麦区小麦耐迟播高分蘖资源的鉴定与筛选. 麦类作物学报, 2015, 35(4): 494-498.
SHANG Y, ZHU J H, HUA W, WANG J M, JIA Q J, YANG J M. Identification and selection of wheat germplasm with high tillering ability under late sowing for southern winter wheat zone. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(4): 494-498. (in Chinese)
- [10] 张敏, 王岩岩, 蔡瑞国, 李婧实, 王文颇, 周印富, 李彦生, 杨树宗. 播期推迟对冬小麦产量形成和籽粒品质的调控效应. 麦类作物学报, 2013, 33(2): 325-330.
ZHANG M, WANG Y Y, CAI R G, LI J S, WANG W P, ZHOU Y F, LI Y S, YANG S Z. Regulating effect of delayed sowing date on yield formation and grain quality of winter wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(2): 325-330. (in Chinese)
- [11] EHDAIE B, WAINES J G. Sowing date and nitrogen rate effects on dry matter and nitrogen partitioning in bread and durum wheat. *Field Crops Research*, 2001, 73(1): 47-61.
- [12] 刘万代, 陈现勇, 尹钧, 杜沛鑫. 播期和密度对冬小麦豫麦 49-198 群体性状和产量的影响. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 464-469.
LIU W D, CHEN X Y, YIN J, DU P X. Effect of sowing date and planting density on population trait and grain yield of winter wheat cultivar Yumai 49-198. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(3): 464-469. (in Chinese)
- [13] 陈素英, 张喜英, 毛任钊, 王彦梅, 孙宏勇. 播期和播量对冬小麦

- 冠层光合有效辐射和产量的影响. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 681-685.
- CHEN S Y, ZHANG X Y, MAO R Z, WANG Y M, SUN H Y. Effect of sowing date and rate on canopy intercepted photo-synthetically active radiation and yield of winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(4): 681-685. (in Chinese)
- [14] 李宁, 段留生, 李建民, 翟志席, 李召虎. 播期与密度组合对不同穗型小麦品种花后旗叶光合特性、籽粒库容能力及产量的影响. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 296-302.
- LI N, DUAN L S, LI J M, ZHAI Z X, LI Z H. Effect of sowing date and planting density on flag leaf photosynthesis, storage capacity after anthesis and yield in different spike type cultivars. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2): 296-302. (in Chinese)
- [15] 杨勇. 晚播小麦高产优质栽培机理与技术研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2001.
- YANG Y. Study on mechanism and cultural technique for high yield and good quality of late sowing wheat[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2001. (in Chinese)
- [16] PHOTIADES I, HADJICHRISTODOULOU A. Sowing date, sowing depth, seed rate and row spacing of wheat and barley under dry land conditions. *Field Crops Research*, 1984(9): 151-162.
- [17] EHDAIE B, WAINES J G. Sowing date and nitrogen rate effects on dry matter and nitrogen partitioning in bread and durum wheat. *Field Crops Research*, 2001, 73(1): 47-61.
- [18] 郇庆炉, 薛香, 梁云娟, 吴玉娥, 茹振钢. 暖冬气候条件下调整小麦播种期的研究. 麦类作物学报, 2016, 22(2): 46-50.
- GAO Q L, XUE X, LIANG Y J, WU Y E, RU Z G. Studies on regulating sowing time of wheat under the warm winter conditions. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 22(2): 46-50. (in Chinese)
- [19] CARR P M, HORSLEY R D, POLAND W W. Tillage and seeding rate effects on wheat cultivars. *Crop Science*, 2003, 43(1): 202-218.
- [20] 侯庆福, 周复来. 小麦独秆栽培法的播种期试验简报. 莱阳农学院学报, 1988, 5(4): 17-19.
- HOU Q F, ZHOU F L. Brief report on sowing date of wheat single-crop cultivation method. *Journal of Laiyang Agricultural College*, 1988, 5(4): 17-19. (in Chinese)
- [21] KIBE A M, SINGH S, KALRA N. Water nitrogen relationships for wheat growth and productivity in late sown conditions, *Agricultural Water Management*, 2006, 84(3): 221-228.
- [22] 刁操铨. 作物栽培学各论. 北京: 中国农业出版社, 1994: 101-107.
- DIAO C Q. *Crop Cultivation*. Beijing: China Agriculture Press, 1994: 101-107. (in Chinese)
- [23] 莫惠栋. 农业试验统计. 第2版. 上海: 上海科学技术出版社, 1992: 467-602.
- MO H D. *Agricultural Experimentation*. 2nd edn. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Press, 1992: 467-602. (in Chinese)
- [24] 史晓芳, 仇松英, 史忠良, 谢福来, 高炜, 宋立红. 播期和播量对冬小麦尧麦 16 群体性状和产量的影响. 麦类作物学报, 2017, 37(3): 357-365.
- SHI X F, QIU S Y, SHI Z L, XIE F L, GAO W, SONG L H. Effect of sowing date and sowing amount on population traits and yield of winter wheat cultivar Yaomai 16. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(3): 357-365. (in Chinese)
- [25] 刘萍, 郭文善, 浦汉春, 封超年, 朱新开, 彭永欣. 灌浆期高温对小麦剑叶抗氧化酶及膜脂过氧化的影响. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2403-2407.
- LIU P, GUO W S, PU H C, FENG C N, ZHU X K, PENG Y X. Effects of high temperature during grain filling period on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in flag leaves of wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2403-2407. (in Chinese)
- [26] SHAH N H, PAULSEN G M. Interaction of drought and high temperature on photosynthesis and grain-filling of wheat. *Plant and Soil*, 2003, 257: 219-226.
- [27] PLAUT Z, BUTOW B J, BLUMENTHAL C S, WRIGLEY C W. Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature. *Field Crops Research*, 2004, 86: 185-198.
- [28] HAWKER J S, JENNER C F. High temperature affects the activity of enzymes in the committed pathway of starch synthesis in developing wheat endosperm. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1993, 20: 197-209.
- [29] 胡阳阳, 卢红芳, 刘卫星, 康娟, 马耕, 李莎莎, 褚莹莹, 王晨阳. 灌浆期高温与干旱胁迫对小麦籽粒淀粉合成关键酶活性及淀粉积累的影响. 作物学报, 2018, 44(4): 591-600.
- HU Y Y, LU H F, LIU W X, KANG J, MA G, LI S S, CHU Y Y, WANG C Y. Effects of high temperature and water deficiency during grain filling on activities of key starch synthesis enzymes and starch accumulation in wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(4): 591-600. (in Chinese)
- [30] 安浩军, 李亚敏, 狄继革, 张雪花, 冀玉林, 邢志华. 小麦早熟高产品种产量形成特性的分析. 河北农业大学学报, 2005, 28(5): 37-41, 51.

- AN H J, LI Y M, DI J G, ZHANG X H, JI Y L, XING Z H. Analysis on yield formation properties in early maturing and high grain yield wheat cultivars. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2005, 28(5): 37-41, 51. (in Chinese)
- [31] BRUCKNER P L, FROHBERG R C. Rate and duration of grain filling in spring wheat. *Crop Science*, 1987, 27: 451-454.
- [32] 王瑞霞. 不同生态环境下小麦籽粒灌浆速率及有关性状的 QTL 定位分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008: 35-38.
- WANG R X. QTL Mapping for grain filling rate and thousand-grain weight in different ecological environments in wheat. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008: 35-38. (in Chinese)
- [33] KAMALUDDIN, SINGH R M, ABDIN M Z, KHAN M A, ALAM T, KHAM S, PRASAD L C, JOSHI A K. Inheritance of grain filling duration in spring wheat (*Triticum aestivum* L. *em* Thell). *Journal of Plant Biology*, 2007, 50: 504-507.
- [34] TALBERT L E, LANNING S P, MURPHY R L, MARTIN J M. Grain fill duration in twelve hard red spring wheat crosses: genetic variation and association with other agronomic traits. *Crop Science*, 2001, 41: 1390-1395.
- [35] 苗永杰, 阎俊, 赵德辉, 田宇兵, 闫俊良, 夏先春, 张勇, 何中虎. 黄淮麦区小麦主栽品种粒重与籽粒灌浆特性的关系. 作物学报, 2018, 44(2): 260-267.
- MIAO Y J, YAN J, ZHAO D H, TIAN Y B, YAN J L, XIA X C, ZHANG Y, HE Z H. Relationship between grain filling parameters and grain weight in leading wheat cultivars in the Yellow and Huai rivers valley. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(2): 260-267. (in Chinese)
- [36] 任明全, 徐向阳. 不同小麦品种籽粒灌浆特性的研究. 华北农学报, 1993, 8(3): 28-32.
- REN M Q, XU X Y. Studies on the grain filling characters of wheat cultivar. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1993, 8(3): 28-32. (in Chinese)
- (责任编辑 李莉)