



基肥和播种密度对冬小麦干物质积累及 光合特性和产量的影响

陈宏,张保军,海江波,董永利,刘天煜,赵凯男

(西北农林科技大学 农学院,陕西杨凌 712100)

摘要 为探究不同基肥和播种密度对冬小麦‘西农 805’干物质积累及光合特性和产量的影响。采用双因素裂区试验设计,以基肥为主区,设施小麦缓释肥(P1)和常规氮磷钾肥配施(P2)2个处理,以播种密度为副区,设 112.5 kg/hm²(D1)、150 kg/hm²(D2)、187.5 kg/hm²(D3)、225 kg/hm²(D4) 4个水平。结果表明:不同基肥对小麦旗叶干物质积累量、旗叶的 SPAD 值、净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率均未达显著影响,对小麦单位面积穗数、千粒质量有显著影响;播种密度对小麦净光合速率、胞间 CO₂ 浓度、千粒质量、产量有极显著影响;在同一基肥条件下低播种密度处理的小麦单茎干物质积累量及旗叶 SPAD 值较高;基肥和播种密度的交互作用对小麦净光合速率、产量有极显著影响;在施用小麦缓释肥条件下 150 kg/hm² 播种密度的光合特性及产量优于其他处理,在常规氮磷钾肥配施条件下 187.5 kg/hm² 播种密度的光合特性及产量优于其他处理,小麦籽粒产量达到最大为 5 722.02 kg/hm²。综合来看,冬小麦‘西农 805’最佳基肥和播种密度为 P2D3。

关键词 基肥;播种密度;冬小麦;干物质积累;光合特性;产量

中图分类号 S512.1; S311

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2019)12-1969-09

小麦是重要的粮食作物,全球种植广泛,在粮食生产中起着至关重要的地位^[1-2]。近年来人口逐年增加,小麦种植面积下降,引起的粮食生产安全问题日益凸显,要实现小麦产量的提高,需要在肥料和播种密度合理调控等方面有实质性的进展。

肥料对农作物有稳产增产的作用,世界农业的发展历程证明肥料是最快、最有效、最重要的增产措施^[3]。基肥在播前施用,对小麦早期生长发育至关重要,小麦苗期对肥料十分敏感,如果缺乏会造成苗黄、苗弱等不良后果^[4-5]。研究发现小麦基肥采用有机肥和氮、磷、钾按比例混施比单独施用有机肥或化肥效益好^[6]。播种密度影响小麦群体结构的建成,合理播种密度的小麦花后生理活性及光合性能提高,旗叶衰老延缓,同化物合成加快,小麦粒质量提高^[7-8]。不同播种密度形成的群体结构温光环境存在差异,小麦群体对光能的利用、干物质积累与转运能力也会受到影响^[9]。较

小播种密度的小麦在灌浆后期仍有较高的光合水平,随着播种密度的增大,旗叶光合速率在早期发育过程中上升速度较快,且于开花期前达到最大,但在灌浆期时出现下降趋势^[10-11]。播种密度直接影响产量构成要素高低,在一定范围内,小麦产量会随着种植密度增加而增加,但超过一定范围之后,产量会出现下降趋势^[12-14]。

目前,对小麦肥料和播种密度方面的研究多集中于后期追施氮肥和不同播种密度对小麦的影响^[15-18],而对不同基肥和播种密度相结合研究作物干物质积累及光合特性和产量影响规律的报道较少。为此,本研究以陕西关中地区泾阳县西北农林科技大学斗口小麦玉米试验示范站为平台,以冬小麦‘西农 805’为试验材料,探索不同基肥和播种密度对其干物质积累及光合特性和产量的影响,以期确定冬小麦‘西农 805’在陕西关中地区的合理基肥和播种密度提供相应的参考依据。

收稿日期:2019-05-27 **修回日期:**2019-06-09

基金项目:冬小麦立体匀播机械化高产试验示范项目(k4030216124);旱地小麦新品种集雨高效栽培技术研究与示范项目(k336021501)。

第一作者:陈宏,男,硕士研究生,从事小麦高产高效栽培研究。E-mail:1775749783@qq.com

通信作者:张保军,男,教授,硕士生导师,主要从事小麦高产高效栽培研究。E-mail:zhhjun2566@nwsuaf.edu.cn

1 材料与方 法

1.1 试验设计与材料

试验于 2017 年 10 月—2018 年 6 月在陕西省咸阳市泾阳县西北农林科技大学斗口小麦玉米试验示范站进行。试验所在地属于温带大陆性季风半干旱气候区,试验所在地土壤 pH 为 7.87, 0~20 cm 土层基础养分:有机质 17.30 g/kg,全氮 1.22 g/kg,速效磷 29.40 mg/kg,速效钾 228.33 mg/kg。试验地前茬休闲,播种前经过两次旋耕整地,采用双因素裂区试验设计,主区为基肥,设 2 个肥料处理,小麦缓释肥(P1):(控氮,灰白色颗粒状,摇钱树牌,陕西阿康农化有限公司, N:P₂O₅:K₂O=24:15:5) 750 kg/hm²;常规氮磷钾肥配施(P2):尿素[$w(N)=46.4\%$] 390 kg/hm²,过磷酸钙[$w(P_2O_5)=12\%$] 937.5 kg/hm²,硫酸钾钙[$w(K_2O)=24\%$] 156.25 kg/hm²。施用的两种基肥氮磷钾元素含量一样,纯氮 180 kg/hm²,P₂O₅ 112.5 kg/hm²,K₂O 37.5 kg/hm²;副区为播种密度,设 112.5 kg/hm²(D1)、150 kg/hm²(D2)、187.5 kg/hm²(D3)、225 kg/hm²(D4) 4 个水平。试验共 8 个处理,每处理 3 次重复,共 24 个小区,小区面积为 7 m² (3.5 m×2 m),播种方式为穴播,行距 0.25 m,穴距 0.135 m。供试品种为西北农林科技大学农学院提供的半冬性中早熟小麦品种‘西农 805’,该品种籽粒千粒质量 52 g,4 个播种密度每穴分别播种 7、10、12、15 粒。

1.2 测定项目及方法

地上部单茎干物质积累量:于孕穗期、开花期、灌浆期、成熟期随机选择长势均匀、发育正常 20 个小麦单茎取样,置于烘箱中,105℃下杀青 30 min,在 80℃下烘干至恒量,称取干质量,取平均值。

旗叶 SPAD 值:于孕穗期、开花期、开花期后 10 d、开花期后 20 d,每个小区随机挑选 10 个顶部完全展开的旗叶,用 SPAD502Plus 叶绿素仪分别在每个旗叶测定 3 次,取平均值。

光合特性:于开花期后第 10 天测定一次,每小区随机选取 5 片小麦的旗叶,用美国 COR 公司生产的 Li-6400 型便携式光合仪于 9:00—11:00 对旗叶净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气

孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)进行同步测定。

产量指标:成熟期每个小区随机选取 3 个生长均匀一致的 1 m² 面积,统计穗数,取平均值;每个小区随机取 20 个穗,脱粒去杂后统计穗粒数,取平均值;每个小区选取生长均匀一致的 3 行 3 m 长共 2.25 m² 进行收获脱粒,晒干去杂后称量,折算成单位面积籽粒产量;籽粒晒干去杂后每个小区样品数 3 次 1 000 粒小麦称量测定千粒质量(3 次误差在 0.5 g 之内),求平均值。

1.3 数据处理

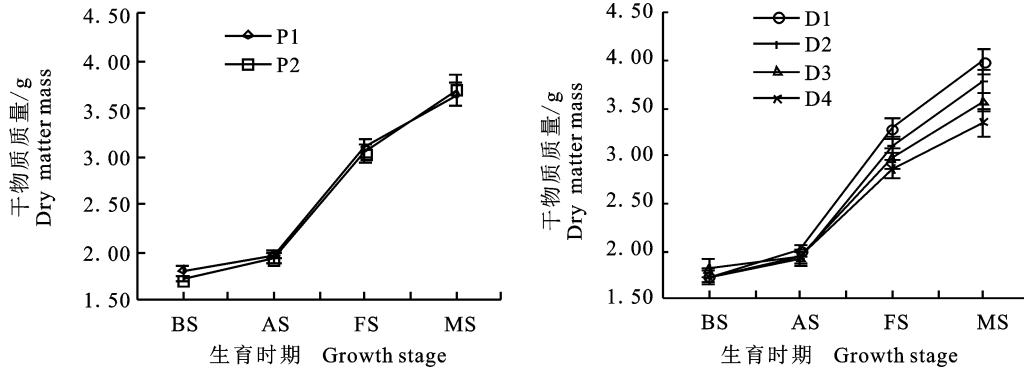
用 Excel 2010 对试验数据整理,用 SPSS 20.0 进行单因素分析,采用 Duncan's 进行多重比较及显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同基肥和播种密度对小麦单茎干物质积累量的影响

由图 1 可以看出,随着小麦生长发育的推进,小麦单茎干物质积累量均呈现出“S”型曲线变化。小麦单茎干物质积累量的速度,在开花期以前缓慢,开花期至灌浆期,急剧加快,灌浆期后放缓。在各生育时期,2 种基肥条件下的干物质积累量差异均不显著,表明基肥对小麦单茎干物质积累量影响较小,开花期后,各个播种密度处理间差异逐渐显著,灌浆期和成熟期小麦的单茎干物质积累量均呈现出 D1>D2>D3>D4,成熟期时,D1 播种密度处理的小麦单茎干物质积累量较 D2、D3、D4 播种密度处理分别提高 5.56%、11.76%、19.10%,表明在低密度有利于小麦单茎干物质积累量的增加。

由图 2 可以看出,随着小麦生育进程的推进,不同基肥和播种密度组合处理的小麦单茎干物质积累量呈现出渐增-快增-缓增的趋势,在开花期之前,小麦单茎干物质积累量的速度缓慢,不同肥密组合处理间差异不显著,开花期到灌浆期是小麦单茎干物质积累量的快增期,开花期后的各处理间差异逐渐显著。在同一种基肥的条件下,灌浆期和成熟期小麦的单茎干物质积累量都呈现出 D1 播种密度条件下最大,P1 和 P2 处理条件下成熟期单茎干物质积累量最大值和最小值分别相差 14.54%、17.94%。



BS. 孕穗期 Booting stage; AS. 开花期 Anthesis stage; FS. 灌浆期 Filling stage; MS. 成熟期 Maturity stage,下同 The same below

图 1 不同基肥和播种密度条件下小麦单茎干物质积累量的变化

Fig. 1 Changes of single stem dry matter mass of wheat under different base fertilizers and sowing densities

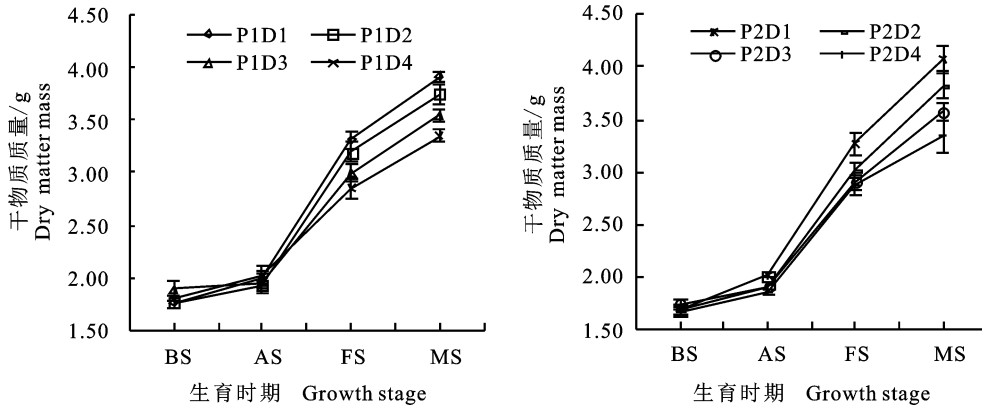


图 2 不同基肥和播种密度互作对小麦单茎干物质积累量的影响

Fig. 2 Effects of single stem dry matter mass of wheat under interaction between different base fertilizers and sowing densities

2.2 不同基肥和播种密度对小麦旗叶 SPAD 值的影响

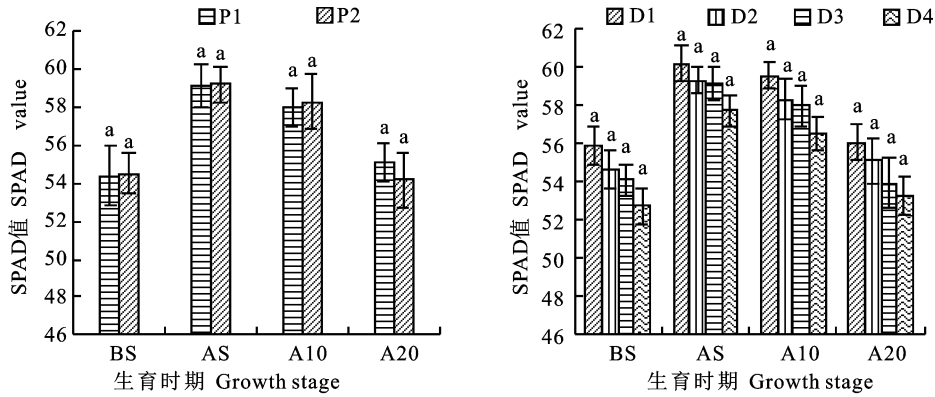
由图 3 可知,基肥和播种密度对孕穗期到花后 20 d 的旗叶 SPAD 值的影响均未达显著。随着生育时期的推进,2 种基肥处理的旗叶 SPAD 值均呈现先升高后降低的趋势,在开花期达到最大值。P2 基肥处理的旗叶 SPAD 值在孕穗期到开花后 10 d 均高于 P1 基肥处理,但差异不显著,表明不同基肥对小麦旗叶 SPAD 值的影响较小。对播种密度进行分析可知,在开花期各播种密度处理间旗叶 SPAD 值达到峰值,在孕穗期到花后 20 d 中的同一时期,随着播种密度的增加,旗叶 SPAD 值呈现逐渐降低的趋势,均在 D1 播种密度处理达到最大值,表现为 D1>D2>D3>D4,但差异不显著,表明播种密度对小麦旗叶 SPAD 值的影响较小。

由图 4 可知,在孕穗期到花后 20 d 的时间

内,在不同基肥和播种密度条件下各组合处理间小麦旗叶 SPAD 值变化均无显著性差异。随着生育时期的推进,同一基肥处理条件下的不同播种密度处理的小麦旗叶 SPAD 值呈现先增高后降低的趋势,4 个播种密度处理条件下的小麦旗叶 SPAD 值在开花期达到峰值,同一生育时期的不同肥密组合处理的小麦旗叶 SPAD 值之间,P1 基肥条件下的 D1 播种密度组合处理的旗叶 SPAD 值达最大,但是与其他肥密组合处理间的差异不显著,表明不同基肥和不同播种密度组合处理对小麦孕穗期到花后 20 d 的旗叶 SPAD 值影响较小。

2.3 不同基肥和播种密度对小麦旗叶光合特性的影响

由表 1 可知,播种密度对小麦旗叶的净光合速率、胞间 CO₂ 浓度有极显著性影响。基肥 P1 条件下的小麦旗叶净光合速率、气孔导度大于 P2



A10. 花后 10 d 10 days after anthesis stage; A20. 花后 20 d 20 days after anthesis stag; 图中同一生育时期不同小写字母表示不同处理间 0.05 水平上差异显著 Letters in the same growth stage in the chart mean significant difference among different treatments at 0.05 level; 下同 the same below

图 3 不同基肥和播种密度条件下小麦旗叶 SPAD 值变化

Fig. 3 Changes of wheat flag leaf SPAD value under different base fertilizers and sowing densities

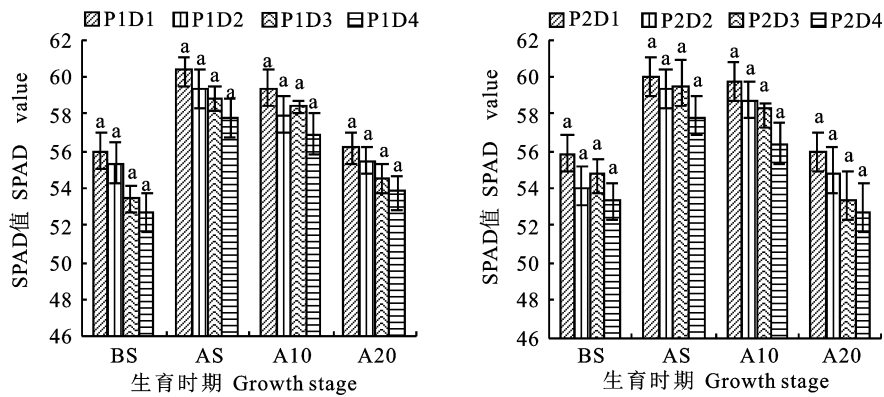


图 4 不同基肥和播种密度互作对小麦旗叶 SPAD 值的影响

Fig. 4 Effects of wheat flag leaf SPAD value under interaction between different base fertilizers and sowing densities

基肥处理,而基肥 P2 条件下的小麦旗叶胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率大于 P1 基肥处理,但处理之间差异不显著,表明不同基肥处理对小麦旗叶光合特性影响不大。随着播种密度的增大,小麦旗叶光合特性的 4 个指标均表现出先增大后减小的趋势。D3 播种密度条件下的小麦旗叶净光合速率最大,较 D1、D2、D4 播种密度处理分别增加 29.86%、4.64%、32.60%,且明显高于其他播种密度处理,表明 D3 播种密度处理有利于小麦净光合速率的发育。

由表 2 可知,基肥和播种密度互作对小麦旗叶净光合速率、气孔导度影响达到极显著性。同一种基肥条件下,随着播种密度的增加,4 个光合特性指标呈现出先增加后降低的趋势,在基肥 P1 条件下的 D2 播种密度处理的小麦旗叶光合特性的 4 个指标达到最大值,而在基肥 P2 条件下的

D3 播种密度处理的小麦旗叶光合特性的 4 个指标达到最大。P1D2 肥密组合处理的净光合速率较 P2D3 肥密组合处理大,增幅为 2.76%,但是处理间差异不显著,表明在两种肥密处理组合条件下都利于小麦的净光合速率发育。

2.4 不同基肥和播种密度对小麦产量的影响

由表 3 可知,基肥对小麦单位面积穗数、千粒质量有显著性影响,播种密度对小麦千粒质量有显著性影响,而对产量有极显著性影响。基肥 P1 条件下的千粒质量高于基肥 P2 处理,且处理间差异显著,表明基肥 P1 更利于千粒质量的提高。基肥 P2 条件下的单位面积穗数高于基肥 P1 处理且处理间差异显著,表明基肥 P2 更利于单位面积穗数的增加。随着播种密度的增加,小麦单位面积穗数、穗粒数、籽粒产量均表现出先增高后降低的趋势,单位面积穗数和籽粒产量均是在 D3

播种密度条件下达到最大值。千粒质量随着播种密度的增加呈现下降趋势,表现为 D1>D2>D3>D4,D1、D2 播种密度处理的千粒质量较 D3、

D4 播种密度处理分别增加 3.14%、3.72% 和 1.58%、2.15%,且处理间差异显著,表明低播种密度可以提高千粒质量。

表 1 不同基肥和播种密度条件下小麦旗叶光合特性变化

Table 1 Changes of photosynthetic characteristics of wheat flag leaves under different base fertilizers and sowing densities

处理 Treatment	$P_n/[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	$G_s/[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	$C_i/(\mu\text{mol}/\text{mol})$	$T_r/[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$
P1	12.87 a	0.27 a	233.38 a	5.56 a
P2	12.24 a	0.26 a	258.14 a	5.71 a
D1	11.12 c	0.25 ab	220.04 b	5.34 a
D2	13.80 b	0.29 a	267.57 a	5.79 a
D3	14.44 a	0.28 ab	266.98 a	5.95 a
D4	10.89 c	0.24 b	228.45 b	5.46 a
F 值 F value	P	0.155	4.93	0.404
	D	87.634 **	11.853 **	0.781

注:同一列的不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著,下同。

Note: Different letters in the same column mean significant difference at 0.05. * and ** refer to significantly different at levels of 0.05 and 0.01 level, the same below.

表 2 不同基肥和播种密度交互对小麦旗叶光合特性的影响

Table 2 Effects of photosynthetic characteristics of wheat flag leaves under interaction between different base fertilizers and sowing densities

基肥 Base fertilizer	播种密度 Sowing density	$P_n/[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	$G_s/[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	$C_i/(\mu\text{mol}/\text{mol})$	$T_r/[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$
P1	D1	10.74 bc	0.26 c	203.65 c	5.35 a
	D2	15.26 a	0.33 a	271.63 ab	6.13 a
	D3	14.03 a	0.27 abc	248.99 ab	5.75 a
	D4	10.29 bc	0.20 c	209.24 c	5.00 a
P2	D1	11.51 bc	0.24 bc	236.44 bc	5.33 a
	D2	12.35 b	0.25 c	263.50 ab	5.45 a
	D3	14.85 a	0.28 ab	284.97 a	6.15 a
	D4	11.49 c	0.27 abc	247.66 ab	5.92 a
F 值 F value	P×D	15.599 **	6.442 **	2.290	1.128

表 3 不同基肥和播种密度条件下小麦产量及其构成因素的变化

Table 3 Changes of wheat yield and its components under different base fertilizers and sowing densities

处理 Treatment	单位面积穗数($\times 10^4$)/ hm^{-2} Ear	穗粒数 Kernels per spike	千粒质量/g 1 000-grain mass	籽粒产量/(kg/hm^2) Grain yield
P1	319.55 b	41.73 a	50.98 a	5 095.36 a
P2	347.78 a	41.71 a	50.12 b	5 329.15 a
D1	313.57 b	40.97 a	51.60 a	4 988.01 b
D2	345.44 ab	42.83 a	50.82 ab	5 374.00 a
D3	350.63 a	42.40 a	50.03 bc	5 442.71 a
D4	325.00 ab	40.68 a	49.75 c	5 044.31 b
F 值 F value	P	30.536 *	0.127	29.553 *
	D	2.579	0.562	8.951 *
				12.507
				10.403 **

由表 4 可知,基肥和播种密度的交互作用在小麦籽粒产量上达显著性影响。不同处理组合的产量及构成因素差异不同,P2D3 处理的小麦籽

粒产量要素协调的最好,籽粒产量达到最大为 5 775.07 kg/hm^2 ,较 P1D2 处理条件下产量 5 451.18 kg/hm^2 增幅为 5.94%,且者之间存在

显著性差异。同一基肥条件下,小麦单位面积穗数和穗粒数随着播种密度的增加呈现出先增加后降低的趋势,基肥 P1 条件下的 D2 播种密度处理的单位面积穗数和穗粒数达到最大,基肥 P2 条件下的 D3 播种密度处理的单位面积穗数和穗粒

数达到最大,不同处理组合的穗粒数之间差异不显著。2 种基肥条件下的千粒质量均随着播种密度呈持续下降趋势,分别于 P1D1 和 P2D1 处理条件下到达最大值。

表 4 不同基肥和播种密度互作对小麦产量及其构成因素的影响

Table 4 Effects of wheat yield and its components under interaction between different base fertilizers and sowing densities

基肥 Base fertilizer	播种密度 Sowing density	单位面积穗数($\times 10^4$)/ hm^{-2} Ear	穗粒数 Kernels per spike	千粒质量/g 1 000-grain mass	籽粒产量/(kg/hm^2) Grain yield
P1	D1	298.70 c	40.87 a	51.71 a	4 894.27 d
	D2	343.11 abc	43.80 a	51.38 ab	5 451.18 b
	D3	321.27 bc	41.93 a	50.60 abc	5 110.35 cd
	D4	315.11 bc	40.31 a	50.22 bcd	4 925.65 d
P2	D1	328.44 bc	41.07 a	51.50 a	5 081.75 cd
	D2	347.78 ab	41.85 a	50.25 bcd	5 296.81 bc
	D3	380.00 a	42.88 a	49.47 cd	5 775.07 a
	D4	334.89 abc	41.05 a	49.28 d	5 162.97 bcd
F 值 F value	P×D	1.110	0.222	0.606	5.582*

3 讨论

李娜等^[19]研究发现施肥可提高旗叶叶绿素含量和光合速率。马迎辉等^[20]研究表明,基肥用量过大会使小麦生育前期干物质积累速度较快,但是生育后期速度减慢,不利于后期干物质向小麦籽粒的转运。适宜的小麦群体花后光合功能持续期更长,叶绿素含量高,花后干物质的积累量增加^[21]。播种密度较大时,灌浆中期之后群体内部矛盾激化,中下部光照严重不足,叶片逐渐变黄甚至枯萎,最终导致成熟期干物质积累量不高^[22]。有研究认为播种密度对旗叶 SPAD 值影响不显著,花后的小麦旗叶叶绿素含量和籽粒的质量关系密切^[23-24]。有研究证实可以通过提高小麦单叶净光合速率来增加小麦产量^[25-26]。本研究中两种基肥条件下低播种密度 $112.5 \text{ kg}/\text{km}^2$ 的群体单茎干物质积累量和旗叶 SPAD 值都表现出明显的优势,但小麦群体较小,单位面积光合面积也较小,两种基肥条件下高播种密度 $225 \text{ kg}/\text{km}^2$ 的群体前期光合面积较大,但随着小麦发育的进行,群体内矛盾激化,加速叶片衰老,单茎干物质积累量和旗叶 SPAD 值都较小,最终两种基肥条件下过低和过高播种密度都表现为成熟期单位面积小麦干物质积累量小。在小麦缓释肥条件下 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 播种密度处理和常规氮磷钾

肥配施条件下 $187.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 播种密度处理的小麦群体结构协调,叶片光合功能期延长,净光合速率均高于施用同一基肥条件下其他密度处理,生育后期仍保留较大的群体数量,成熟期单位面积干物质积累量较大。由此表明,不同基肥条件下适宜的播种密度的小麦群体光合功能期较长且具有优良的温光环境,提高小麦群体光能利用效率和干物质积累量。

在大田生产条件下,肥料投入对于培肥地力、改善经济性状和提高作物产量方面起着不可替代的关键性作用^[27]。刘万代等^[28]和曹倩等^[29]认为密度适宜有利于调解个体与群体之间的冲突,对产量三要素的协调发展也有重要影响,适当增加播种密度有利于小麦产量的提高,但继续增加播种密度小麦产量反而会下降。本研究中基肥对小麦单位面积穗数、千粒质量有显著性影响,播种密度对小麦千粒质量、产量有极显著性影响,基肥和播种密度的交互作用在小麦产量上达到极显著水平,随着播种密度的增加,小麦产量呈现出先升高后降低的趋势,在施用同一基肥的情况下,随着播种密度的增加,小麦单位面积穗数和穗粒数呈现出和小麦产量相同的趋势,旗叶叶绿素含量与小麦籽粒质量都随着播种密度的增加呈现下降趋势,低播种密度和小麦缓释肥均能提高小麦的千粒质量,产量的表现和花期的叶片光合特性相关,

小麦产量和净光合速率都是在小麦缓释肥条件下 150 kg/hm² 播种密度处理和常规氮磷钾肥配施条件下 187.5 kg/hm² 播种密度处理时达到最大,在常规氮磷钾肥配施条件下 187.5 kg/hm² 播种密度处理的产量三要素协调的最好,小麦产量达到最高。综上所述,冬小麦‘西农 805’最合理的基肥和种植密度组合为常规氮磷钾肥配施:尿素 [w(N) = 46.4%] 390 kg/hm², 过磷酸钙 [w(P₂O₅) = 12%] 937.5 kg/hm², 硫酸钾钙 [w(K₂O) = 24%] 156.25 kg/hm² 和播种密度 187.5 kg/hm²。

参考文献 Reference:

- [1] 崔振岭,石立委,李俊良,等. 氮肥施用对冬小麦产量、品质和氮素表观损失的研究[J]. 应用生态学报, 2005(11): 67-71.
CUI ZH L, SHI L W, LI J L, *et al.* Effects of N fertilization on winter wheat grain yield and its crude protein content and apparent N losses [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005(11): 67-71.
- [2] 屈会娟,李金才,沈学善,等. 种植密度和播期对周麦 18 碳氮转运、籽粒淀粉及蛋白质含量的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(10): 23-27.
QU H J, LI J C, SHEN X SH, *et al.* Effects of planting densities and sowing dates on carbon and nitrogen transport, grain starch and protein content of Zhoumai 18 [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2009, 24(10): 23-27.
- [3] BOCKMAN O C, KAARSTAD O, LIE O H, *et al.* Agriculture and Fertilizers [M]. Norsh Hydro, Oslo: Agricultural Group, 1990.
- [4] 原向阳,张丽光,张平平,等. 不同底肥对冬小麦产量构成及生理生化指标的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 38-40.
YUAN X Y, ZHANG L G, ZHANG P P, *et al.* Effects of different base fertilizers on yield components, physiological and biochemical traits of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(3): 38-40.
- [5] 韩丽娟. 小麦底肥施用技术[J]. 现代农村科技, 2018(2): 53.
HAN L J. Application technology of wheat base fertilizers [J]. *Modern Rural Science and Technology*, 2018(2): 53.
- [6] 丁广刚,肖文信,田元. 小麦不同基肥施用效果分析[J]. 农技服务, 2017, 34(13): 72.
DING G G, XIAO W X, TIAN Y. Analysis of the effect of different base fertilizer application in wheat [J]. *Agricultural Technology Service*, 2017, 34(13): 72.
- [7] 查菲娜. 种植密度对两种穗型冬小麦品种主要生理特性及产量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2007.
CHA F N. Effects of planting densities on main physiological characteristics and yield of two spike-type winter wheat varieties [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2007.
- [8] 于振文,岳寿松,沈成国,等. 不同密度对冬小麦开花后叶片衰老和粒重的影响[J]. 作物学报, 1995, 21(4): 412.
YU ZH W, YUE SH S, SHEN CH G, *et al.* Effects of different densities on leaf senescence and grain weight of winter wheat after flowering [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(4): 412.
- [9] 淮贺举,陆洲,秦向阳,等. 种植密度对小麦产量和群体质量影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(9): 1-4.
HUAI H J, LU ZH, QIN X Y, *et al.* Advances of researches in plant density on wheat yield and population quality [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(9): 1-4.
- [10] 岳寿松,元新华,余松烈. 冬小麦生育后期的群体光合作用与物质生产能力[J]. 山东农业大学学报, 1992, 23(1): 9-13.
YUE SH S, YUAN X H, YU S L. Population photosynthesis and material production capacity of winter wheat in late growth stage [J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1992, 23(1): 9-13.
- [11] 董树亭. 高产冬小麦群体光合能力与产量关系的研究[J]. 作物学报, 1991, 17(6): 461-469.
DONG SH T. Study on the relationship between photosynthetic capacity and yield of high-yielding winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1991, 17(6): 461-469.
- [12] 张一,陈献营,李金才,等. 播期与密度对 33°N 线旱茬麦小麦产量及构成因素的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(27): 11699-11700.
ZHANG Y, CHEN X Y, LI J C, *et al.* Effect of sowing date and density on yield and its components of drought wheat in 33° north latitude [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(27): 11699-11700.
- [13] 张永丽,肖凯,李雁鸣. 种植密度对杂种小麦 C6-38/Py85-1 旗叶光合特性和产量的调控效应及其生理机制[J]. 作物学报, 2005, 31(4): 498-505.
ZHANG Y L, XIAO K, LI Y M. Effects and physiological mechanism of planting densities on photosynthesis characteristics of flag leaf and grain yield in wheat hybrid C6-38/Py85-1 [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(4): 498-505.
- [14] 张定一,张永清,闰翠萍,等. 基因型、播期和密度对不同成穗型小麦籽粒产量和灌浆特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(1): 28-34.
ZHANG D Y, ZHANG Y Q, RUN C P, *et al.* Effects of genotype, sowing date and planting density on grain filling and yield of wheat varieties with different ears forming characteristics [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2009, 15(1): 28-34.
- [15] 武文明,李金才,陈洪俭,等. 氮肥运筹方式对孕穗期受渍冬小麦穗部结实特性与产量的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1888-1896.

- WANG W M, LI J C, CHEN H J, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on seed-setting characteristics of spike and grain yield in winter [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(10):1888-1896.
- [16] 王彦丽, 邱喜阳, 朱云集, 等. 施氮量和施氮时期对冬小麦幼穗小花发育及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(7):82-87.
- WANG Y L, QIU X Y, ZHU Y J, *et al.* Effect of rate and period of nitrogen application on the floret development and grain yield of winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, 20(7):82-87.
- [17] 李 宁, 段留生, 李建民, 等. 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[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2):296-302.
- LI N, DUAN L SH, LI J M, *et al.* Effect of sowing date and planting density on flag leaf photosynthesis, storage capacity after anthesis and yield in different spike type cultivars [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2):296-302.
- [18] 刘芳亮, 任益锋, 王卫东, 等. 播期和密度对冬小麦普冰 151 籽粒灌浆特性及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(6):41-47.
- LIU F L, REN Y F, WANG W D, *et al.* Effects of sowing date and planting density on grain-filling characteristics and yield of winter wheat cultivar Pubing 151 [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(6):41-47.
- [19] 李 娜, 张保军, 张正茂, 等. 不同施氮量和播量对‘普冰 151’干物质积累特征及籽粒灌浆特性的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(5):693-701.
- LI N, ZHANG B J, ZHANG ZH M, *et al.* Effects of different N application rate and seeding rate on dry matter accumulation and grain filling characteristics of ‘Pubing 151’ [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(5):693-701.
- [20] 马迎辉, 王玲敏, 黄玉芳, 等. 氮肥运筹对冬小麦干物质累积、产量及氮素吸收利用的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(1):187-192.
- MA Y H, WANG L M, HUANG Y F, *et al.* Effect of nitrogen application on dry matter accumulation, yield and nitrogen utilization efficiency of winter wheat [J]. *Acta Agricultura Sinica*, 2013, 28(1):187-192.
- [21] 彭永欣, 郭文善, 严六零, 等. 小麦产量生理调节机理及应用技术研究[J]. 国外农学—麦类作物, 1995(2):36-39.
- PENG Y X, GUO W SH, YAN L L, *et al.* Study on physiological regulation mechanism and application technology of wheat yield [J]. *Foreign Agricultural Sciences-Tritical Crops*, 1995(2):36-39.
- [22] 张文静. 播种密度与氮肥运筹对冬小麦产量和品质影响的研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2004.
- ZHANG W J. Studies on grain yield and quality under the different seeding rate and nitrogen application regimes in winter wheat [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2004.
- [23] 王竞绍. 密度和氮肥运筹对不同穗型小麦产量和品质性状影响研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2010.
- WANG J SH. Effect of different seeding density and nitrogen application on yield and quality of two wheat varieties with different spike type [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2010.
- [24] WALULU S R, ROSENOW T D, WELTER B D, *et al.* Inheritance of the stay green trait in sorghum [J]. *Crop Science*, 1994, 34(4):970-972.
- [25] AUSTIN R B. Genetic constrains on photosynthesis and yield in wheat [J]. *Advance Photosynthesis Research*, 1984 (4):103-110.
- [26] 李举华, 林荣芳, 刘兆丽, 等. 长期定位施肥对冬小麦叶面积指数及群体受光态势的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(3):209-212.
- LI J H, LIN R F, LIU ZH L, *et al.* Effects of long-term located fertilization on leaf area index and light distribution in winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(3):209-212.
- [27] 吕丽华, 姚海坡, 申海平, 等. 不同肥料种类对小麦产量和土壤肥力的影响[J]. 河北农业科学, 2016, 20(2):34-39.
- LÜ L H, YAO H P, SHEN H P, *et al.* Effects of different kinds of fertilizer on wheat yield and soil fertility [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2016, 20(2):34-39.
- [28] 刘万代, 陈现勇, 尹 钧, 等. 播期和密度对冬小麦豫麦 49-198 群体性状和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(3):464-469.
- LIU W D, CHEN X Y, YIN J, *et al.* Effects of sowing date and planting density on population trait and grain yield of winter wheat cultivar Yumai 49-198 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(3):464-469.
- [29] 曹 倩, 贺明荣, 代兴龙, 等. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学, 2011, 17(4):815-822.
- CAO Q, HE M G, DAI X L, *et al.* Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4):815-822.

Effects of Base Fertilizers and Sowing Densities on Dry Matter Accumulation, Photosynthetic Characteristics and Yield of Winter Wheat

CHEN Hong, ZHANG Baojun, HAI Jiangbo, DONG Yongli,
LIU Tianyu and ZHAO Kainan

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract To explore the effects of different base fertilizers and seeding densities on dry matter accumulation, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat ‘Xinong 805’. Two-factor rip-zone test design was used. Base fertilizer was applied in the main area, two fertilizers patterns of wheat slow release fertilizer (P1) and combined application of N, P and K conventional fertilizer (P2) were conducted, four levels of sowing density in sub-area, including 112.5 kg/hm² (D1), 150 kg/hm² (D2), 187.5 kg/hm² (D3), 225 kg/hm² (D4), the results showed that different base fertilizers did not have significant effects on the dry matter accumulation of flag leaf, SPAD value of flag leaf, net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration and transpiration rate, but it had significant effects on the number of spikes per plant area and 1 000-grain mass; the sowing density had a significant effect on the net photosynthetic rate, intercellular CO₂ concentration, 1 000-grain mass and yield of wheat; single stem dry matter of wheat and the SPAD value of flag leaf under low sowing density and the same base fertilizer condition was higher; the interaction between base fertilizer and sowing density reached a very significantly high level in the net photosynthetic rate and yield of wheat; under the condition of wheat slow release fertilizer and sowing density of 150 kg/hm², the photosynthesis characteristics and yield performance were too much higher than other treatments, under the condition of combined application of N, P and K conventional fertilizer and sowing density of 187.5 kg/hm², the photosynthesis characteristics and yield performance were more better than other treatments; under the condition of combined application of N, P and K conventional fertilizer and sowing density 187.5 kg/hm², the wheat grain yield reached the maximum of 5 722.02 kg/hm². In summary, the best base fertilizer type and sowing density of winter wheat ‘Xinong 805’ is P2D3.

Key words Base fertilizers; Sowing densities; Winter wheat; Dry matter accumulation; Photosynthetic characteristics; Yield

Received 2019-05-27

Returned 2019-06-09

Foundation item High-yield Experimental Demonstration Project of Winter Wheat Three-dimensional Uniform Mechanization (No. k4030216124); Research and Demonstration Project of High-efficiency Cultivation Techniques of Rainfall Wheat New Varieties (No. k336021501).

First author CHEN Hong, male, master student. Research area: wheat high-efficiency cultivation. E-mail: 1775749783@qq.com

Corresponding author ZHANG Baojun, male professor, master supervisor. Research area: wheat high-efficiency cultivation. E-mail: zhbjun2566@nwsuaf.edu.cn

(责任编辑:史亚歌 **Responsible editor: SHI Yage**)