

种植密度对小麦群体质量叶绿素荧光参数和产量的影响

张向前^{1,2}, 杜世州^{1,2}, 曹承富^{1,2}, 乔玉强^{1,2}, 赵 竹^{1,2}, 张耀兰^{1,2}

(1. 安徽省农业科学院作物研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 安徽省农作物品质改良重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 为进一步改善小麦群体质量, 研究了不同密度下皖麦 52 和烟农 19 主要生理指标及产量间的差异。结果表明: 烟农 19 的叶面积指数在基本苗 $120 \times 10^4 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M1) 和 $210 \times 10^4 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M2) 下高于皖麦 52, 而在 $300 \times 10^4 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M3) 和 $390 \times 10^4 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M4) 下低于皖麦 52; 皖麦 52 和烟农 19 各生育期的叶绿素含量及灌浆期的各叶绿素荧光参数 (F_o 、 F_m 、 F_v/F_m 、 qP 、 ETR 和 Φ_{psII}) 皆随种植密度的增加而降低, 且同一密度下两品种间的差异皆不显著; 皖麦 52 和烟农 19 的产量随种植密度的增加呈现先增加后下降的趋势, 在 M1 和 M2 下, 烟农 19 的产量高于皖麦 52, 分别增加了 13.4% 和 2.4%, 在 M3 和 M4 下, 皖麦 52 的产量高于烟农 19, 分别增加了 10.7% 和 1.0%; 皖麦 52 和烟农 19 的经济系数随密度的增加而降低, 两品种间存在一定差异, 但同一密度下不显著; 相关分析表明, 小麦实际光化学效率 (Φ_{psII}) 与单茎干物重、叶绿素含量呈直线正相关关系, 叶面积指数与单茎干物重呈直线负相关关系, 与产量呈二次抛物线的关系。研究得出, 烟农 19 的高产适宜密度为基本苗 120 万 ~ 210 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$, 皖麦 52 为 210 万 ~ 300 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。

关键词: 密度; 干物重; 叶绿素; 叶绿素荧光; 产量

中图分类号: S311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)05-0093-07

Effect of planting density on population quality, chlorophyll fluorescence parameters and yield of wheat

ZHANG Xiang-qian^{1,2}, DU Shi-zhou^{1,2}, CAO Cheng-fu^{1,2}, QIAO Yu-qiang^{1,2},
ZHAO Zhu^{1,2}, ZHANG Yao-lan^{1,2}

(1. Crops Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;
2. Anhui Provincial Key Laboratory of Crops Quality Improvement, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: To further improve the wheat population quality, the differences in main physiological indexes and yield of Wanmai 52 and Yannong 19 under different planting densities were investigated. The results showed that the leaf area index of Yannong 19 was higher than that of Wanmai 52 under basic seedling $120 \times 10^4 \text{plant} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M1) and $210 \times 10^4 \text{plant} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M2), while was lower than that of Wanmai 52 under $300 \times 10^4 \text{plant} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M3) and $390 \times 10^4 \text{plant} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M4). The chlorophyll content at each growth stage and each chlorophyll fluorescence parameter (F_o 、 F_m 、 F_v/F_m 、 qP 、 ETR and Φ_{psII}) at filling stage of Wanmai 52 and Yannong 19 were decreased with the increasing of planting density, and the difference between the two wheat varieties was insignificant under the same planting density. The yield of Wanmai 52 and Yannong 19 had a change trend of first increased and then decreased with the increasing of planting density, the yield of Yannong 19 was higher than that of Wanmai 52 under M1 and M2, and increased by 13.4% and 2.4% respectively, while under M3 and M4, the yield of Wanmai 52 was higher than that of Yannong 19, and increased by 10.7% and 1.0% respectively. The economic coefficient of Wanmai 52 and Yannong 19 was decreased with the increasing of planting density, and there were some differences between the two varieties, but under the same planting density was insignificant. Correlation analysis revealed that the actual photochemical efficiency (Φ_{psII}) of wheat leaves were positively correlated to dry matter weight per stem, chlorophyll content with the shape of a straight line; the leaf area in-

收稿日期: 2014-02-05
基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303102); 国家科技支撑计划 (2012BAD04B09; 2011BAD16B06; 2013BAD07B08)
作者简介: 张向前 (1984—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事作物栽培研究。E-mail: xiangqian111@163.com。
通信作者: 曹承富 (1963—), 男, 研究员, 主要从事小麦栽培研究。E-mail: caocfu@126.com。

dex was negatively correlated to dry matter weight per stem with the shape of a straight line, and had a parabolic relationship with yield. All the findings demonstrated that the suitable planting density of Yannong 19 was the basic seedling $120 \times 10^4 \sim 210 \times 10^4$ plant $\cdot$ hm $^{-2}$, and Wanmai 52 was $210 \times 10^4 \sim 300 \times 10^4$ plant $\cdot$ hm $^{-2}$.

Keywords: density; dry matter weight; chlorophyll; chlorophyll fluorescence; yield

小麦作为我国黄淮海平原最重要的粮食作物之一,其产量的高低在我国粮食安全中具有举足轻重的地位^[1-2]。我国人多地少的基本国情和现实条件决定了我国小麦增产的主要途径只能靠提高单产来实现^[3]。作物高产是个体与群体协调的共同结果,建立合理的群体结构有利于缓解个体与群体的矛盾,利于穗数、穗粒数和粒重的协调发展^[4]。刘丽平等^[5]指出,合理的群体结构需要密度与株型的合理配置,因此,选取适宜的株型和基本苗数,是创建合理群体动态结构,形成优化产量结构的基本措施。不同小麦品种和种植密度在很大程度上影响着小麦的群体结构,进而影响着群体的光能利用和干物质生产^[4,6],而高产作物群体在作物生长发育期间应具有高的光合效能和干物质积累量。

叶面积指数在一定程度上反映了作物群体光合面积的大小,叶绿素是植物进行光合作用的物质基础^[7],通过叶绿素荧光可以快速、灵敏和非破坏性地分析环境因子对光合作用的影响^[8-9],干物质积累量是作物产量形成的物质基础。生产实践和科学研究都证明,根据品种类型确定合理种植密度是提高小麦群体产量、降低生产成本的一项重要农艺措施,本试验研究了不同品种和密度下小麦单株(茎)干物重、叶面积指数、叶绿素含量、叶绿素荧光参数、产量及经济系数间的差异,一方面从光合效能和干物质积累方面揭示密度对不同小麦品种产量影响的潜在机理,另一方面为安徽小麦主产区密度合理配置及高产栽培提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2011—2012 年在安徽省蒙城县农业示范场进行,试验地土质为砂姜黑土,耕作层(0~20 cm)含有机质 $13.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $69.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $19.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $199.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

试验采用裂区设计,品种为主区,密度为裂区,3 次重复。2 个小麦品种分别为烟农 19(YN19,强分蘖力)和皖麦 52(WM52,中等分蘖力),4 个播种密度分别为基本苗 $120 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M1)、 $210 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M2)、 $300 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M3)和 $390 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ (M4)。

试验小区面积为 10 m^2 ($3.0 \text{ m} \times 3.33 \text{ m}$),行距 20 cm,并于 10 月 10 日播种。施肥设为施纯氮 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; K_2O $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;氮肥 50%基施,50%拔节期追施,磷肥和钾肥作为基肥一次施用,其它田间管理措施同当地大田高产栽培要求。

1.2 样品采集与测定

单株(茎)干物重:分别于各生育期取样 10 株/小区,将样品在 105°C 下杀青 20 min, 80°C 烘干至恒重,称取干物重。拔节期测定项目为单株干物重(分蘖节以上的茎叶干重);抽穗期(抽穗后包括穗重)、开花期和成熟期测定项目为单茎干物重。

叶面积指数:先用直尺测量叶片的长度和最宽处(10 株/小区),然后用长和宽的乘积再乘以折算系数 0.83 确定单叶叶面积,叶面积指数 = 叶片总面积(m^2)/土地面积(m^2)。

叶绿素含量:用手持式叶绿素测定仪(SPAD-502)测定。

叶绿素荧光:采用德国 WALZ 公司生产的 PAM-2500 型荧光仪测定小麦旗叶叶绿素荧光各参数,测定时选取生长一致且受光方向相同的旗叶,首先暗适应 20 min 进行暗适应测定,然后再进行光适应测定。测定叶绿素荧光参数包括初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、可变荧光(F_v)、最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率(Φ_{psII})、光化学淬灭系数(qP)和电子传递速率(ETR)。

产量:分小区收割晒干后折算成大田量。经济系数 = 经济产量/生物产量。

1.3 统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理和作图,采用 SPSS17.0 软件和最小显著差数法(LSD)进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 密度对不同小麦品种单株(茎)干物重的影响

从表 1 可以看出,WM52 和 YN19 各生育期的单株(茎)干物重皆随种植密度的增加而降低,其中 M1 下各生育期的单株(茎)干物重与 M3 和 M4 的差异皆显著。WM52 和 YN19 拔节期、抽穗期、开花期和成熟期 M1 下的单株(茎)干物重分别比 M4 下的增

加了 8.9%、28.9%、21.1%、23.1% 和 29.4%、25.2%、22.0%、21.5%。在 M1 和 M2 下,YN19 的单株干物重皆高于 WM52,分别增加了 9.9%和 6.6%,在 M3 和 M4 下,WM52 的单株干物重皆高于 YN19,分别增加了 2.9%和 8.1%。在同一密度下,WM52 抽穗期、开花期和成熟期的单茎干物重皆高于

YN19,但差异绝大多数不显著,其中在 M1 和 M4 下分别增加了 5.7%、3.5%、4.7% 和 2.6%、4.3%、3.4%。从以上分析可以得出,增加种植密度会降低小麦单株(茎)干物重,且两品种间存在一定差异,密度对单株(茎)干物重的影响大于品种间的差异。

表 1 密度对不同小麦品种不同生育期单株(茎)干物重的影响/g

Table 1 Effects of planting density on dry matter weight per plant (stem) of different wheat varieties at different growth stages					
密度 Density	品种 Variety	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage
M1	WM52	2.32 ± 0.14 b	2.05 ± 0.09 a	2.64 ± 0.15 a	3.79 ± 0.11 a
	YN19	2.55 ± 0.08 a	1.94 ± 0.04 ab	2.55 ± 0.12 ab	3.62 ± 0.08 b
M2	WM52	2.26 ± 0.05 bc	1.87 ± 0.11 bc	2.49 ± 0.13 bc	3.56 ± 0.08 bc
	YN19	2.41 ± 0.07 ab	1.80 ± 0.07 cd	2.39 ± 0.03 cd	3.46 ± 0.06 c
M3	WM52	2.15 ± 0.06 cd	1.77 ± 0.05 cd	2.36 ± 0.10 cd	3.23 ± 0.08 d
	YN19	2.09 ± 0.09 de	1.69 ± 0.09 de	2.31 ± 0.05 de	3.18 ± 0.05 de
M4	WM52	2.13 ± 0.06 cd	1.59 ± 0.05 ef	2.18 ± 0.05 ef	3.08 ± 0.06 ef
	YN19	1.97 ± 0.06 e	1.55 ± 0.07 f	2.09 ± 0.05 f	2.98 ± 0.07 f
显著性检验(P 值)Significance test (P values)					
密度 Density		0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
品种 Variety		0.2369	0.0199	0.0361	0.0045
密度 × 品种 Density × Variety		0.0043	0.8488	0.9522	0.6135

注:表中数据为平均数 ± 标准差。各列后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 ($P < 0.05$)。皖麦 52(WM52);烟农 19(YN19)。密度: M1(120×10^4 株·hm⁻²); M2(210×10^4 株·hm⁻²); M3(300×10^4 株·hm⁻²); M4(390×10^4 株·hm⁻²); 拔节期为单株干物重,抽穗期、开花期和成熟期为单茎干物重。

Note: Values are means ± SD. Small letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$). Jointing stage: dry matter weight per plant; Heading stage, flowering stage and maturity stage: dry matter weight per stem.

2.2 密度对不同小麦品种叶面积指数的影响

叶面积指数过高和过低都不利于群体产量的行成,过高会造成群体通风不良,易倒伏和发生病害,过低会导致群体总光合效率低下,不利于光合产物的积累。从图 1 可以看出,随种植密度的增加,WM52 和 YN19 的叶面积指数呈逐渐增加的趋势,且相邻两密度间差异皆显著 ($P < 0.05$),其中 WM52 和 YN19 的叶面积指数 M2 比 M1,M3 比 M2,M4 比 M3 分别增加了 14.1%、15.6%、8.0% 和 12.7%、11.9%、7.7%。在 M1 和 M2 下,YN19 的叶面积指数高于 WM52,分别增加了 3.4%和 2.2%,在 M3 和 M4 下,WM52 的叶面积指数高于 YN19,分别增加了 1.2%和 1.5%,但同一密度下两品种间的差异不显著。从以上分析可以得出,增加种植密度可以显著增加小麦群体的叶面积指数,密度对叶面积指数的影响大于品种间的差异。

2.3 密度对不同小麦品种叶绿素含量的影响

随种植密度的增加(表 2),WM52 和 YN19 各生

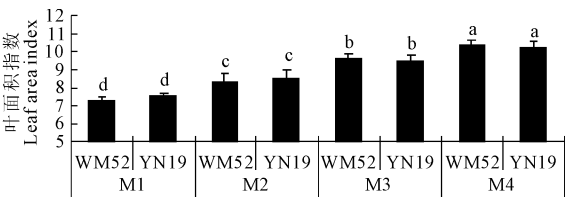


图 1 密度对不同小麦品种灌浆期叶面积指数的影响

Fig.1 Effect of planting density on leaf area index of different wheat varieties at filling stage

注:柱状图上的不同字母代表差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Histograms capped with different letters indicate significant difference ($P < 0.05$). The same as below.

育期的叶绿素含量呈逐渐下降的趋势,且 M1 下 WM52 和 YN19 的叶绿素含量皆与 M3 和 M4 下各自的差异显著 ($P < 0.05$),其中 M1 下 WM52 和 YN19 拔节期、抽穗期、开花期和灌浆中期的叶绿素含量分别比 M4 下各自的增加了 22.4%、18.4%、9.6%、26.7% 和 23.2%、20.7%、12.2%、30.7%。从表中

亦可看出,同一密度下,WM52 的叶绿素含量皆高于 YN19,但差异皆不显著。因此可以得出,增加种植密度可显著降低小麦叶绿素含量,WM52 在该试验条件下其个体发育相对较好,具有较高的叶绿素含量,但品种效应不显著,密度对叶绿素含量的影响大于品种间的差异。

表 2 密度对不同小麦品种不同生育期叶绿素含量的影响 (SPAD 值)

Table 2 Effects of planting density on chlorophyll content of different wheat varieties at different growth stages (SPAD values)					
密度 Density	品种 Variety	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	灌浆中期 Middle of filling stage
M1	WM52	42.63 ± 2.89 a	49.23 ± 2.60 a	61.00 ± 2.95 a	40.20 ± 1.83 a
	YN19	40.73 ± 1.93 ab	47.83 ± 2.35 ab	60.13 ± 1.99 ab	39.00 ± 1.44 a
M2	WM52	39.97 ± 2.77 abc	47.30 ± 2.25 ab	58.83 ± 1.27 abc	38.73 ± 3.59 a
	YN19	38.37 ± 2.96 bcd	46.33 ± 3.68 ab	58.37 ± 2.72 bcd	38.23 ± 3.00 ab
M3	WM52	36.67 ± 1.16 cde	44.50 ± 1.35 bc	57.57 ± 2.16 cde	34.47 ± 1.85 bc
	YN19	35.53 ± 1.63 de	42.07 ± 1.85 cd	56.03 ± 1.70 def	32.40 ± 1.35 cd
M4	WM52	34.83 ± 1.95 de	41.57 ± 1.91 cd	55.67 ± 1.86 ef	31.73 ± 1.33 cd
	YN19	33.07 ± 2.21 e	39.63 ± 2.51 d	53.57 ± 2.44 f	29.83 ± 1.64 d
显著性检验 (P 值)Significance test (P values)					
密度 Density		0.0001	0.0002	0.0001	0.0001
品种 Variety		0.0866	0.1085	0.0534	0.1449
密度 × 品种 Density × Variety		0.9900	0.9556	0.7718	0.9262

注:表中数据为平均数 ± 标准差。各列后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 (P < 0.05)。
Note: Values are means ± SD. Small letters in the same column indicate significant difference (P < 0.05).

2.4 密度对不同小麦品种叶绿素荧光参数的影响

随播种密度的增加(表 3),WM52 和 YN19 表中各荧光参数数值逐渐下降,M1 下 WM52 和 YN19 的 F_o 、 F_m 、 F_v/F_m 、 qP 、 ETR 和 Φ_{psII} 皆高于 M4 下各自对应的荧光参数值,分别增加了 14.6%、8.7%、10.5%、37.1%、25.0%、13.6% 和 18.5%、12.2%、

8.1%、43.3%、25.3%、16.4%,且差异绝大多数显著 (P < 0.05)。同一密度下,WM52 表中各荧光参数值皆高于 YN19,但差异皆不显著。从以上分析可以得出,增加种植密度会降低小麦叶绿素荧光参数,两品种间各叶绿素荧光参数存在一定差异,但不显著,密度对叶绿素荧光参数的影响大于品种间的差异。

表 3 密度对不同小麦品种灌浆期叶绿素荧光参数的影响

Table 3 Effect of planting density on chlorophyll fluorescence parameters of different wheat varieties at filling stage							
密度 Density	品种 Variety	初始荧光 F_o	最大荧光 F_m	最大光化学效率 F_v/F_m	光化学淬灭系数 qP	电子传递速率 ETR	实际光化学效率 Φ_{psII}
M1	WM52	63.50 a	376.17 a	0.918 a	0.480 a	42.70 a	0.753 a
	YN19	62.77 a	370.97 a	0.882 ab	0.463 ab	41.23 ab	0.737 ab
M2	WM52	60.57 ab	366.40 a	0.873 bc	0.430 abc	39.73 abc	0.727 abc
	YN19	60.53 ab	365.80 a	0.864 bc	0.410 abc	38.30 abcd	0.713 abc
M3	WM52	58.40 bc	356.83 ab	0.858 bcd	0.387 bcd	36.93 bcd	0.683 bcd
	YN19	56.20 cd	347.53 ab	0.836 cd	0.377 cd	33.93 d	0.673 bcd
M4	WM52	55.43 cd	346.13 ab	0.831 cd	0.350 cd	34.17 cd	0.663 cd
	YN19	52.97 d	330.50 b	0.816 d	0.323 d	32.90 d	0.633 d
显著性检验 (P 值) Significance test (P values)							
密度 Density		0.0001	0.0165	0.0008	0.0004	0.0024	0.0035
品种 Variety		0.1986	0.2974	0.0623	0.0132	0.1994	0.2903
密度 × 品种 Density × Variety		0.7997	0.8933	0.7981	0.9912	0.9628	0.9720

注:各列后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 (P < 0.05)。
Note: Small letters in the same column indicate significant difference (P < 0.05).

2.5 密度对不同小麦品种产量的影响

随种植密度的增加(图 2),WM52 和 YN19 的产量呈现先增加后下降的趋势,WM52 在 M3 下的产量最高为 8 122.4 kg·hm⁻²,YN19 在 M2 下的产量最高为 7 978.6 kg·hm⁻²。WM52 在 M2 和 M3 下的产量差异不显著,但分别与 M1 和 M4 下的产量差异显著($P < 0.05$);YN19 在 M1 和 M2 下的产量差异不显著,但分别与 M3 和 M4 下的差异显著。因此可以得出,WM52 的高产适宜密度为基本苗 210 万~300 万株·hm⁻²,YN19 为 120 万~210 万株·hm⁻²。从图中亦可看出,在 M1 和 M2 下 YN19 的产量皆高于 WM52,分别增加了 13.4% 和 2.4%;在 M3 和 M4 下,WM52 的产量皆高于 YN19,分别增加了 10.7% 和 1.0%。因此可以得出在一定范围内,增加播种密度有利于提高小麦产量,且在低密度下 YN19 具有较好的群体产量优势,而在相对较高的密度下,WM52 则表现出良好的群体产量优势。

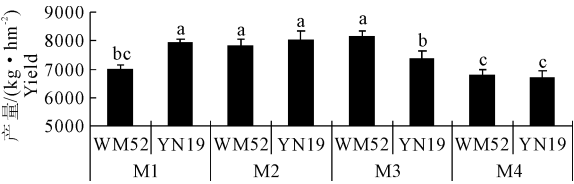


图 2 密度对不同小麦品种产量的影响

Fig.2 Effect of planting density on yield of different wheat varieties

2.6 密度对不同小麦品种经济系数的影响

随种植密度的增加(图 3),WM52 和 YN19 的经济系数(经济产量与生物产量比值)逐渐降低,且同一密度下 WM52 的经济系数皆高于 YN19,在 M1、M2、M3 和 M4 下分别比 YN19 增加了 4.1%、3.9%、9.2% 和 11.2%,但差异皆不显著($P > 0.05$)。M1 下 WM52 和 YN19 的经济系数皆显著高于 M2、M3 和 M4 下各自的经济系数,分别增加了 13.3%、19.6%、43.8% 和 12.9%、25.4%、53.6%。从以上分析可以得出,增加种植密度可使小麦经济系数显著降低,经济系数品种间存在一定差异,但不显著,密度对经济系数的影响大于品种间的差异。

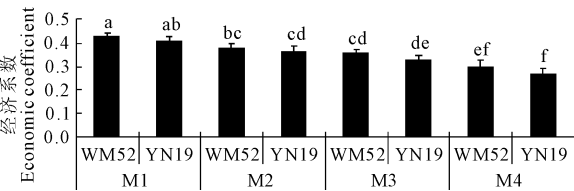


图 3 密度对不同小麦品种经济系数的影响

Fig.3 Effect of planting density on economic coefficient of different wheat varieties

2.7 相关性分析

从图 4 可以看出,小麦实际光化学效率与单茎干物重(开花期数据)、叶绿素含量(开花期数据)皆呈显著($P < 0.05$)直线正相关关系,且决定系数 R^2 皆大于 0.9,说明了在一定范围内增加小麦实际光化学效率有利于提高小麦单茎干物重和叶绿素含量。从图中亦可看出,小麦群体叶面积指数与单茎干物重呈显著直线负相关关系,说明了小麦群体叶面积指数的增加(本试验中由密度增加导致)不利于小麦个体的生长发育和干物质积累。小麦群体叶面积指数与产量呈二次抛物线的关系,说明了在一定范围内增加小麦群体叶面积指数有利于提高小麦产量,而当叶面积指数过高时则会导致产量下降,这主要可能是由于群体叶面积过大时,降低了群体的通风透光能力,不仅使个体间竞争加大,而且会使群体更易倒伏和发生病虫害,最终导致产量的下降。

3 讨 论

小麦营养器官碳同化的强弱和光合产物在营养器官积累的多寡,都直接影响着后期小麦的粒重和产量的形成。屈会娟等^[10]研究发现冬小麦品种兰考矮早八不同播期条件下开花期和成熟期的单茎干物重均表现为低密度>中密度>高密度。本研究发现 WM52 和 YN19 不同生育期的单株(茎)干物重随播种密度的增加逐渐降低,拔节期 YN19 在 M1 和 M2 下的单株干物重高于 WM52,而在 M3 和 M4 下却低于 WM52,WM52 抽穗期、开花期和成熟期的单茎干物重在同一密度下皆高于 YN19。这主要可能是由于 YN19 的分蘖能力强于 WM52(故拔节期单株干物重在低密度下高于 WM52,而在高密度下分蘖能力受到一定限制,单株干物重低于 WM52),WM52 的单株个体生长发育状态优于 YN19(故抽穗期、开花期和成熟期的单茎干物重高于 YN19)。丛新军等^[11]在研究中也指出,当小麦基本苗大于 180 万株·hm⁻²时,由于拔节期的无效分蘖较多,个体发育相对不健壮,不利于干物质积累。叶片是作物光合作用最重要的器官,叶面积指数作为群体结构的重要标志,既衡量小麦群体光合面积的大小,又反映出群体动态的大小^[12-13],但是叶面积指数过高和过低皆不利于群体产量的形成。本研究发现随着播种密度的增加,小麦叶面积指数呈现逐渐增加的趋势,在低密度下(M1 和 M2) YN19 的叶面积指数高于 WM52,在高密度下(M3 和 M4)却低于 WM52。这主要可能是由于低密度下 YN19 的分蘖能力相对较强,其叶面积指数高于 WM52,而在高密度下一方面

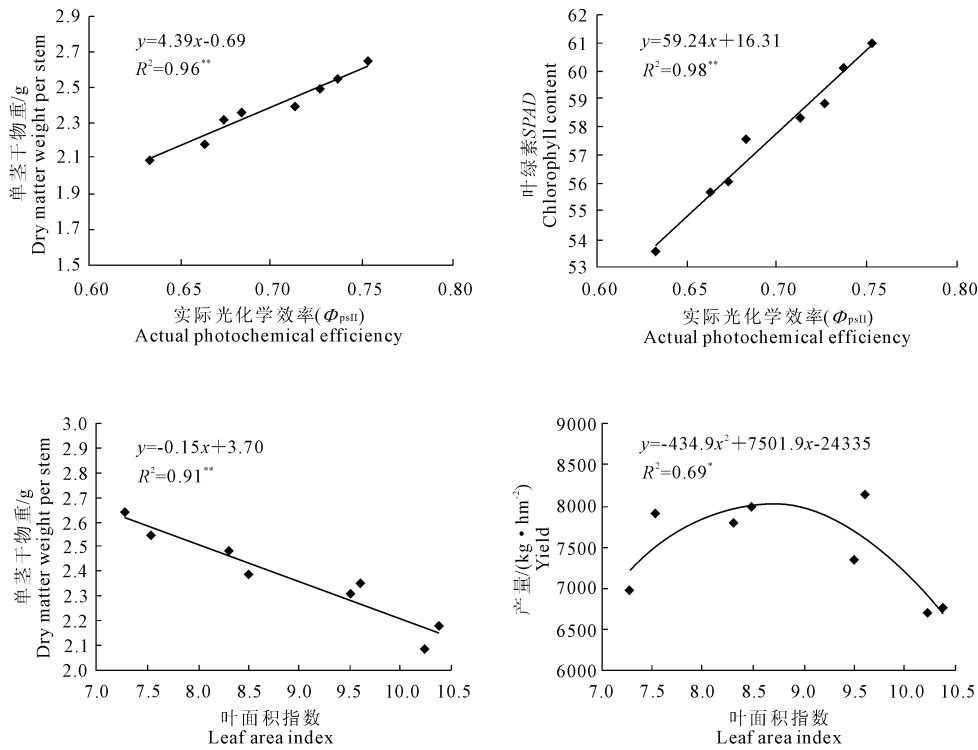


图 4 小麦实际光化学效率 (Φ_{psII})、叶面积指数与单茎干物重、叶绿素含量、籽粒产量的关系

Fig.4 Regression relationships of Φ_{psII} , leaf area index with dry matter weight per stem, chlorophyll content and grain yield of wheat

YN19 的分蘖能力明显受到限制,另一方面 WM52 的群体自我调节能力较强,其耐密性和个体生长发育状态皆优于 YN19,故 WM52 叶面积指数在高密度下高于 YN19。此外本研究亦发现密度对小麦群体叶面积指数的影响大于品种间差异的影响。

叶绿素作为光合色素中重要的色素分子,在光合作用过程中担负着光能吸收、传递与转化的重要作用,因此其含量的高低在一定程度上决定了光合速率的大小,并对产量产生重要的影响^[14-16]。叶绿素荧光是探测和分析作物光合功能的重要手段,能够较好的反映作物“内在”光系统性能,当外界条件改变时,作物体内叶绿素荧光参数的变化可在一定程度上反映环境因子对作物光合性能的影响^[17-19]。李晶等^[20]在研究中指出降低小麦种植密度可以改善小黑麦叶片光合功能,提高最大荧光产量 (F_m)和 PSⅡ 光能转换效率及 PSⅡ 电子传递活性 (ETR)。本研究发现随着播种密度的增加 WM52 和 YN19 的叶绿素含量及叶绿素荧光参数 F_o 、 F_m 、 F_v/F_m 、 qP 、 ETR 和 Φ_{psII} 皆呈现逐渐降低的趋势,表明了小麦群体密度的增加不利于小麦植株个体的生长发育,使其光合能力下降,并导致叶绿素含量及各荧光参数数值的下降。此外本研究亦发现同一密度下 WM52 的叶绿素含量和各叶绿素荧光参数值皆高于 YN19,但差异皆不显著,而密度对它们的影响却达

到显著水平,表明了密度对叶绿素和叶绿素荧光的影响大于品种间的差异。李宁等^[21]在研究中同样发现不同密度处理对不同穗型小麦品种叶绿素荧光动力学参数存在明显影响,其中多穗型品种良星 99 在中播常规播量时其 P_n 、 F_v/F_o 和 F_v/F_m 最大。

适宜的种植密度和品种可以创建优良的群体结构^[22-23],提高作物的产量和经济系数。胡焕焕等^[24]在研究中发现密度对河农 822 各生育时期的总茎数、产量及其各构成因素的影响皆达到显著水平。海江波等^[25]研究认为,小麦播量为 $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,群体、个体特征及产量与品质性状的协调性最好。本研究不仅发现随着播种密度的增加 WM52 和 YN19 的经济系数(作物经济产量与生物产量的比值)逐渐降低,产量呈现先增加后下降的趋势,而且发现密度对经济系数的影响大于品种间的差异。该结果一方面表明了在一定范围内适当增加播种密度有利于提高作物产量,另一方面表明了作物在低密度下更有利于光合产物向籽粒的转移,而在高密度下光合产物则多转向于无效分蘖和结实率低下的作物营养器官。本研究得出低密度下 WM52 的植株各生理指标和个体生长发育状态略优于 YN19,但由于 YN19 的分蘖能力强于 WM52,故低密度下 YN19 更易获得相对较高的产量。而在相对较高的密度下,一方面 YN19 的分蘖能力会明显受到

抑制,并造成无效分蘖增多,另一方面 WM52 的群体自我调节能力相对较强,其个体生长发育状况及各生理指标和群体质量皆略优于 YN19,故在相对较高的密度下 WM52 更易获得较高的产量。在本试验条件下,小麦各生理指标及经济系数主要受密度的影响(同一密度下品种间差异绝大多数不显著),而产量不仅受到密度的显著影响,且在一定密度下品种间的差异可达显著水平,YN19 的高产适宜密度为基本苗 120 万~210 万株·hm⁻²,WM52 为 210 万~300 万株·hm⁻²。由于小麦播种密度不仅受到品种的影响,而且受到土壤肥力、播期和当地气候资源的影响,因此在今后的研究中有必要加强多因素(土壤肥力、播期等)交互作用下小麦适宜播种密度的研究,以改善作物生理特性,充分协调作物个体与群体间的关系,创建优良的群体结构,实现作物群体的最高产。

参 考 文 献:

[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,2005,16(11):2071-2075.

[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.

[3] 朱翠林,李锐宁,张保军,等.早肥地密度对大穗型冬小麦品种生育特性及产量的影响[J].西北农业学报,2010,19(1):71-75.

[4] 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.

[5] 刘丽平,胡焕焕,李瑞奇,等.行距配置和密度对冬小麦品种河农 822 群体质量及产量的影响[J].华北农学报,2008,23(2):125-131.

[6] 蒋会利.播期密度对不同小麦品种群体茎数及产量的影响[J].西北农业学报,2012,21(6):67-73.

[7] Zhang X Q, Huang G Q, Bian X M, et al. Effects of root interaction and nitrogen fertilization on the chlorophyll content, root activity, photosynthetic characteristics of intercropped soybean and microbial quantity in the rhizosphere[J]. Plant, Soil and Environment, 2013,59(2): 80-88.

[8] Tung J, Goodwin P H, Hsiang T. Chlorophyll fluorescence for quantification of fungal foliar infection and assessment of the effectiveness of an induced systemic resistance activator[J]. European Journal of Plant Pathology, 2013,136(2):301-315.

[9] 郭天财,王书丽,王晨阳,等.种植密度对不同筋力型小麦品种荧光动力学参数及产量的影响[J].麦类作物学报,2005,25(3): 63-66.

[10] 屈会娟,李金才,沈学善,等.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[J].作物学报,2009,35(1):124-131.

[11] 丛新军,吴 科,钱兆国,等.超高产条件下种植密度对泰山 21 号群体动态、干物质积累和产量的影响[J].山东农业科学,2004,(4):16-18.

[12] Ryu Y, Nilsonb T, Kobayashi H, et al. On the correct estimation of effective leaf area index: Does it reveal information on clumping effects? [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010,150(3):463-472.

[13] 王 夏,胡 新,孙忠富,等.不同播期和播量对小麦群体性状和产量的影响[J].中国农学通报,2011,27(21):170-176.

[14] 余利平,张春雷,马 宽,等.甘蓝型油菜对干旱和低磷双重胁迫的生理反应Ⅱ:叶片叶绿素含量及叶绿素荧光参数[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):169-175.

[15] Nikolaeva M K, Maevskaya S N, Shugaev A G, et al. Effect of drought on chlorophyll content and antioxidant enzyme activities in leaves of three wheat cultivars varying in productivity[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2010,57(1):87-95.

[16] Guendouz A, Guessoum S, Maamari K, et al. Predicting the efficiency of using the RGB (Red, Green and Blue) reflectance for estimating leaf chlorophyll content of durum wheat (Triticum durum Desf.) genotypes under semi arid conditions[J]. American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture, 2012,6(2):102-106.

[17] 刘 露,丁柳雨,陈伟洲,等.不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响[J].生态学报,2013,33(13): 3916-3924.

[18] Ye Z P, Yu Q, Kang H J. Evaluation of photosynthetic electron flow using simultaneous measurements of gas exchange and chlorophyll fluorescence under photorespiratory conditions [J]. Photosynthetica, 2012,50(3):472-476.

[19] 肖华贵,杨焕文,饶 勇,等.甘蓝型油菜黄化突变体的光合特性及叶绿素荧光参数分析[J].作物学报,2013,39(3):520-529.

[20] 李 晶,李双双,付 驰,等.密度和施氮水平对小黑麦叶绿素荧光特性的影响[J].麦类作物学报,2011,31(1):143-148.

[21] 李 宁,翟志席,李建民,等.播种期和密度对不同穗型小麦品种荧光动力学参数及产量的影响[J].华北农学报,2009, 24(增刊):199-204.

[22] 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.

[23] 梁素明,王爱萍,任海娥,等.不同株型玉米品种密度制约对源库形成与产量的影响[J].山西农业科学,2013,41(7):686-692.

[24] 胡焕焕,刘丽平,李瑞奇,等.播种期和密度对冬小麦品种河农 822 产量形成的影响[J].麦类作物学报,2008,28(3):490-49.

[25] 海江波,由海霞,张保军.不同播量对面条专用小麦品种小偃 503 生长发育、产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2002,22(3):92-94.