

烟农 19 叶绿素荧光、光合特性及产量 对播期和密度的响应

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:为明确播期和密度对小麦光合效应及产量的影响,研究了6个播期和4种密度对小麦品种烟农19(半冬偏冬性)的影响。结果表明,同一播期下,小麦抽穗期和灌浆中期的叶面积指数随密度的增加而增加,并以10月10日(S2,正常播种)和10月17日(S3,适度晚播)播种的最高。同一密度下,小麦不同生育期的叶绿素含量及灌浆中期的各叶绿素荧光参数(F_o 、 F_m 、 F_v/F_m 、ETR和 Φ_{psII})皆以10月10日和10月17日播种的最高,且同一播期下随密度的增加而降低。播期和密度对小麦光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度和蒸腾速率具有明显的影响,并在合理播期10月10日和10月17日及适宜密度120万株/hm²(M1)和210万株/hm²(M2)下表现最优。2年小麦高产播期密度组合皆为S2M1、S2M2、S3M1和S3M2,其产量2011年分别为7 892.8, 7 978.6, 7 996.2, 8 020.6 kg/hm², 2012年分别为7 911.5, 7 978.6, 7 970.1, 8 032.9 kg/hm²。相关分析表明,小麦叶面积指数与产量呈二次抛物线的关系,叶绿素含量、光合速率和实际光化学效率与产量呈直线正相关关系。研究得出,淮北地区烟农19的适宜播期为10月10日-10月17日,适宜密度为基本苗120~210万株/hm²。

关键词:叶面积指数;叶绿素含量;光合速率;叶绿素荧光

中图分类号:S572.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2014)02-0133-08

Response of Chlorophyll Fluorescence, Photosynthetic Characteristics and Yield of Yannong 19 to Sowing Date and Density

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 230031, China;

2. Anhui Provincial Key Laboratory of Crops Quality Improvement, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to understand the impact of sowing date and density on photosynthetic effect and yield of wheat, the effect of six sowing dates and four kinds of planting densities on wheat variety of Yannong 19 (Semi-winter and inclined to winteriness) was studied. The results showed that the leaf area index of wheat at heading and middle of filling stages was increased with the increasing of planting density under the same sowing date, and the sowing dates of October 10 (S2, normal sowing date) and October 17 (S3, moderately late sowing) had the highest values. Under the same planting density, the highest values of chlorophyll content at different growth stages and each chlorophyll fluorescence parameter (F_o , F_m , F_v/F_m , ETR and Φ_{psII}) at middle of filling stage were all appeared at the sowing dates of October 10 and October 17, and they decreased with the increasing of plant density under the same sowing date. The photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration and transpiration rate of wheat were obviously influenced by sowing date and planting density, and they performed the best under reasonable sowing date of October 10 and October 17 and suitable density of 120×10^4 /ha and 210×10^4 /ha. The two-year high yield combinations of sowing date and density were S2M1, S2M2, S3M1 and S3M2, and the yields of 2011 were 7 892.8, 7 978.6, 7 996.2, 8 020.6 kg/ha, of 2012 were 7 911.5, 7 978.6, 7 970.1, 8 032.9 kg/ha, respectively.

收稿日期:2014-01-12

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303102);国家科技支撑计划项目(2012BAD04B09;2011BAD16B06;2013BAD07B08)

作者简介:张向前(1984-),男,安徽阜阳人,助理研究员,博士,主要从事小麦栽培研究。

通讯作者:曹承富(1963-),男,安徽安庆人,研究员,硕士,主要从事小麦栽培研究。

Correlation analysis revealed that the leaf area index of wheat had a quadratic parabola relationship with yield, and chlorophyll content, photosynthetic rate and actual photochemical efficiency were positively correlated to yield with the shape of a straight line. The study indicated that the suitable sowing date of Yannong 19 in Huaibei area was October 10 – October 17, and the reasonable density was the basic seedling $120 - 210 \times 10^4/\text{ha}$.

Key words: Leaf area index; Chlorophyll content; Photosynthetic rate; Chlorophyll fluorescence

小麦是我国仅次于水稻的第二大粮食作物^[1],其产量的高低对确保我国粮食安全具有重要的意义。提高单位面积产量是小麦育种和栽培的主要目标之一^[2],而光合效能小麦产量形成中发挥着极其重要的作用,不但影响着小麦的营养生长和生殖生长,而且决定着籽粒后期的灌浆速率和干物质积累量,因此,改善光合作用对提高小麦生产力及籽粒产量具有重要的意义^[3]。播期和种植密度是作物栽培过程中较易控制的 2 个关键因素。不同的播期不仅使作物生长发育期间温度、光照等生态条件产生差异,而且使生长发育过程中的光合作用及营养物质的运转分配发生变化,进而对作物干物质积累和产量形成影响^[4]。不同种植密度可造成作物群体结构的不同,从而使作物群体局部温光等生态条件产生差异^[5]。因此,进一步加强播期和密度对作物光合生理生态影响的研究具有重要的现实意义。

植物绿色叶面积的大小对光能利用、干物质积累、收获量及经济效益都有显著的影响,近年来,叶面积指数已成为在植物光合作用、蒸腾作用、水分利用及构成生产力基础等方面进行群体生长分析时必不可少的一个重要参数^[6]。叶绿素是植物进行光合作用的物质基础,其含量的高低与作物光合效能密切相关^[7]。叶绿素荧光动力学特征可直接反应出植物的光合性能,与传统的“表观性”的气体交换指标相比,叶绿素荧光参数更能反映植物光合的“内在性”特征,可以快速、灵敏和非破坏性地分析环境因子对光合作用影响的潜在机理^[8-10]。光合作用是作物生物产量和经济产量形成的物质基础,改善作物光合特性,是充分挖掘作物产量的一个重要方面^[11]。为此本试验研究了播期和密度对小麦叶面积指数、叶绿素含量、光合特性、叶绿素荧光及产量的影响,旨在通过对小麦光合效能和产量的研究明确安徽淮北地区主栽小麦品种的适宜播期和密度,以达到进一步改善小麦光合效能和提高单产的目的,同时为该区小麦生产提供理论帮助和技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于 2010 – 2011 和 2011 – 2012 年在安徽省

蒙城县农业科技示范场进行,试验所在地土质为砂姜黑土,0 ~ 20 cm 耕层土 2 年平均基础肥力为(年际间差异不显著):有机质 13.08 g/kg,全氮 1.14 g/kg,全磷 0.79 g/kg,碱解氮 67.72 mg/kg,有效磷 18.97 mg/kg,速效钾 195.67 mg/kg。

试验采用裂区设计,播期为主区,密度为裂区,3 次重复。6 个播期分别为 S1(10 月 3 日)、S2(10 月 10 日,正常播种)、S3(10 月 17 日,适度晚播)、S4(10 月 24 日)、S5(10 月 31 日)和 S6(11 月 7 日);4 个种植密度分别为 M1(基本苗 120 万/hm²)、M2(210 万/hm²)、M3(300 万/hm²)和 M4(390 万/hm²)。试验小区面积为 10 m²(3.0 m × 3.33 m),种植小麦品种为烟农 19(半冬偏冬性,强分蘖力,当地主栽品种),行距 20 cm。施肥设为施纯氮 240 kg/hm²,P₂O₅ 90 kg/hm²;K₂O 120 kg/hm²;氮肥 50% 基施,50% 拔节期追施,磷肥和钾肥作为基肥一次施用,其他田间管理措施同当地大田栽培。

1.2 样品采集与测定

叶面积指数:首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(LAI) = 叶片总面积/土地面积。

叶绿素含量:用手持式叶绿素测定仪(SPAD-502)测定,每一时期选取小麦植株中部相同部位的叶片在上面均匀取 5 个点测定,后期测定的为旗叶。

光合特性:在小麦灌浆中期,选择晴朗天气在上午 9:30 开始,采用 Li-6400 便携式光合仪分别测定小麦旗叶光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率。

叶绿素荧光:采用 PAM-2500 型荧光仪(德国 WALZ 公司)测定小麦旗叶各叶绿素荧光参数,测定时选取生长且受光方向一致的旗叶,先暗适应 20 min 进行暗适应测定,然后再进行光适应测定。测定荧光参数包括初始荧光(F₀)、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})和电子传递速率(ETR)。

产量:分小区收割风干后折算成大田量。

1.3 统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 软件对数据进行处理和作图,采用 SPSS 17.0 软件和最小显著差数法

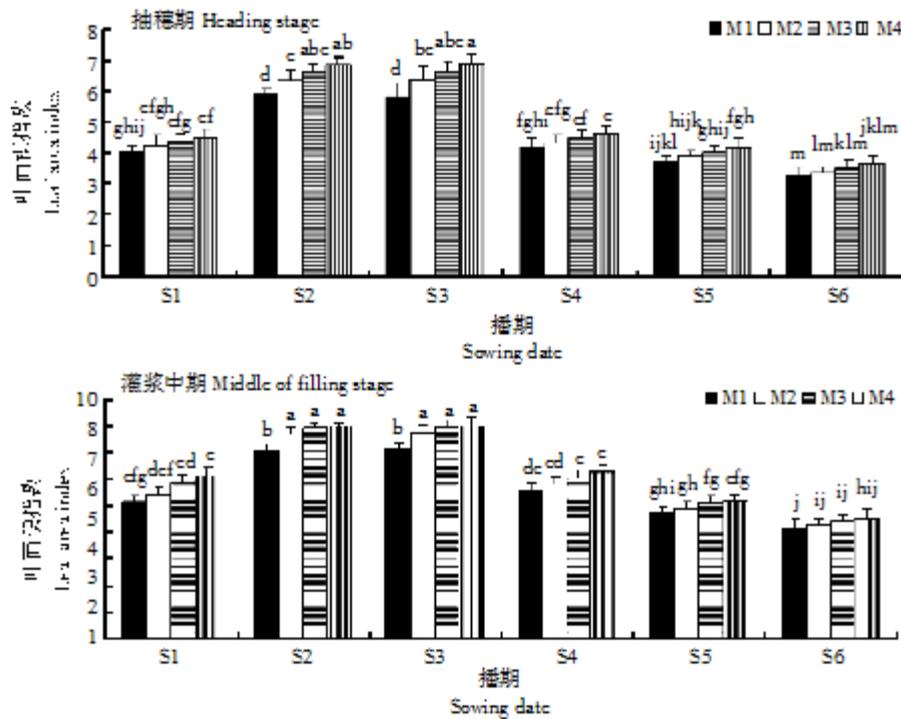
(LSD) 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 播期和密度对叶面积指数的影响

同一密度下(图 1), 烟农 19 抽穗期和灌浆中期的叶面积指数皆以 S2(正常播种)和 S3(适度晚播)播期的最高, 且两播期间差异不显著, 但与其他播期间的差异显著。在同一密度 M1、M2、M3 和 M4 下, S2 比 S1 和 S6 的叶面积指数在抽穗期分别增加了 45.1%、51.4%、51.3%、52.0% 和 80.1%、87.4%、

88.1%、86.7%, 在灌浆中期分别增加了 31.9%、34.1%、29.4%、25.7% 和 55.4%、63.0%、63.4%、61.2%。在同一播期下, 随密度的增加烟农 19 抽穗期和灌浆中期的叶面积指数呈逐渐增加的趋势, 在同一播期 S1、S2、S3、S4、S5 和 S6 下, M4 比 M1 的叶面积指数在抽穗期分别增加了 11.3%、16.6%、18.2%、11.2%、12.3% 和 12.5%, 在灌浆中期分别增加了 16.6%、11.1%、10.8%、10.9%、7.8% 和 7.1%, 且差异绝大多数显著。因此可以得出, 播期和密度对小麦叶面积指数具有明显的影响。



柱状图上的不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。图 2 同。

Histograms capped with different letters indicate significant difference ($P < 0.05$). The same as Fig. 2.

图 1 播期和密度对小麦不同生育期叶面积指数的影响

Fig. 1 Effect of sowing date and planting density on wheat leaf area index at different growth stages

2.2 播期和密度对叶绿素含量的影响

同一密度下(表 1), 小麦不同生育期的叶绿素含量随播期的推迟呈先增加后下降的趋势, 并以 S2 和 S3 播期的最高, 且两播期间差异不显著。在 M2 下, S2 拔节期、抽穗期、开花期和灌浆中期的叶绿素含量分别比 S1 和 S6 增加了 15.2%、11.7%、12.9%、13.9% 和 21.0%、20.4%、13.4%、26.3%, 且差异显著。在同一播期下, 小麦不同生育期的叶绿素含量随密度的增加逐渐下降, 其中在 S2 和 S3 播期, M1 比 M4 的叶绿素含量在拔节期、抽穗期、开花期和灌浆中期分别增加了 11.0%、9.3%、5.3%、9.2% 和 12.7%、9.0%、6.3%、10.0%, 且部分差异达到显著水平。因此可以得出, 正常播种和适度晚播及低密度群体有利于提高小麦叶绿素含量。

2.3 播期和密度对叶绿素荧光的影响

同一密度下(表 2), 随播期的推迟小麦灌浆中期的 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 、ETR 和 Φ_{psII} 呈现先增加后下降的趋势, 并以 S2 和 S3 播期的最高, 且两播期间差异不显著。在 M2 下, S2 比 S1 和 S6 的 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 、ETR 和 Φ_{psII} 分别增加了 5.0%、2.8%、4.1%、12.7%、10.1% 和 21.4%、26.9%、14.6%、35.2%、38.1%。在同一播期下, 随密度的增加, 小麦 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 、ETR 和 Φ_{psII} 呈逐渐下降的趋势, 并皆以 M1 的值最高。在 S2 和 S3 下, M1 比 M4 的 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 、ETR 和 Φ_{psII} 分别增加了 8.6%、11.1%、8.1%、8.9%、9.7% 和 7.9%、11.4%、8.2%、7.3%、10.9%, 且部分差异显著。

表 1 播期和密度对小麦不同生育期叶绿素含量的影响

Tab.1 Effect of sowing date and planting density on wheat chlorophyll content at different growth stages (SPAD values)

播期 Sowing date	密度 Density	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	灌浆中期 Middle of filling stage
S1	M1	35.03 ± 2.70efgh	42.83 ± 2.97defg	53.07 ± 3.93cdefgh	34.00 ± 1.65cdefgh
	M2	34.27 ± 2.72fghi	41.53 ± 2.61fghi	52.00 ± 2.26fgh	33.07 ± 1.46defghij
	M3	33.07 ± 3.07ghij	40.43 ± 1.96ghijk	50.43 ± 2.84gh	32.43 ± 3.01efghij
	M4	31.50 ± 2.74hij	39.77 ± 2.63hijkl	49.57 ± 3.16h	30.47 ± 1.90ijkl
S2	M1	41.37 ± 2.64ab	47.63 ± 2.71a	59.67 ± 3.00a	38.90 ± 2.17a
	M2	39.47 ± 2.81abcd	46.37 ± 1.99abc	58.70 ± 2.36ab	37.67 ± 2.50ab
	M3	38.40 ± 2.40abcdef	44.63 ± 2.71bcde	57.33 ± 2.16abc	36.57 ± 1.80abc
	M4	37.27 ± 2.23cdefg	43.57 ± 2.89cdef	56.67 ± 2.61abcde	35.63 ± 1.38abcdef
S3	M1	41.83 ± 3.00a	47.23 ± 3.23ab	59.80 ± 2.45a	38.23 ± 1.90a
	M2	39.90 ± 2.26abc	46.70 ± 2.11ab	58.27 ± 3.69ab	37.63 ± 2.11ab
	M3	39.07 ± 2.39abcde	44.97 ± 3.07abcd	57.07 ± 2.72abcd	36.07 ± 2.11abcd
	M4	37.13 ± 2.87cdefg	43.33 ± 3.66def	56.23 ± 3.33abcdef	34.77 ± 2.33bcdefg
S4	M1	37.07 ± 2.51cdefg	44.53 ± 3.11bcde	56.93 ± 2.60abcd	35.87 ± 1.79abcde
	M2	35.47 ± 2.08defgh	43.63 ± 3.55cdef	55.87 ± 2.06abcdef	34.17 ± 2.55cdefgh
	M3	34.87 ± 2.35efgh	42.03 ± 3.20efgh	53.57 ± 2.35cdefgh	33.80 ± 3.10cdefghi
	M4	33.97 ± 1.48ghi	41.20 ± 2.85fghij	52.70 ± 2.72defgh	31.57 ± 2.64ghijk
S5	M1	35.53 ± 2.38defgh	40.13 ± 2.45ghijkl	54.93 ± 2.30cdefg	33.83 ± 2.30cdefghi
	M2	33.63 ± 1.86ghij	39.33 ± 1.91hijklm	53.57 ± 3.33cdefgh	32.37 ± 2.42fghij
	M3	32.37 ± 3.46hij	38.67 ± 1.89ijklm	52.30 ± 2.74efgh	31.50 ± 2.35ghijk
	M4	30.57 ± 0.91ij	37.53 ± 2.25lm	50.77 ± 2.43gh	29.77 ± 2.45jkl
S6	M1	33.17 ± 2.30ghij	39.03 ± 2.43ijklm	52.10 ± 2.86fgh	31.07 ± 3.12hijkl
	M2	32.63 ± 2.90hij	38.50 ± 1.65jklm	51.77 ± 3.09fgh	29.83 ± 2.62jkl
	M3	31.33 ± 2.94hij	37.60 ± 1.81klm	50.57 ± 3.42gh	28.70 ± 1.35kl
	M4	29.57 ± 2.97j	36.53 ± 1.96m	49.53 ± 2.80h	27.93 ± 1.89l

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 ($P < 0.05$)。表 2 ~ 3 同。

Note: Values are means ± SD. Small letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$). The same as Tab. 2 - 3.

表 2 播期和密度对小麦灌浆中期叶绿素荧光参数的影响

Tab.2 Effect of sowing date and planting density on wheat chlorophyll fluorescence parameters at middle of filling stage

播期 Sowing date	密度 Density	初始荧光 (F_0) Initial fluorescence	最大荧光 (F_m) Maximum fluorescence	最大光化学效率 (F_v/F_m) Maximal photochemical efficiency	电子传递速率 (ETR) Electron transport rate	实际光化学效率 (Φ_{psII}) Actual photochemical efficiency
S1	M1	58.90 ± 1.93abcde	355.70 ± 13.58abcd	0.876 ± 0.01bcde	37.40 ± 2.11abcde	0.623 ± 0.05abcd
	M2	57.37 ± 2.82cdef	348.97 ± 11.81abcde	0.860 ± 0.01defg	35.37 ± 1.32cdef	0.593 ± 0.04bcdef
	M3	56.13 ± 2.55defg	335.33 ± 17.96cdef	0.850 ± 0.01defgh	33.93 ± 1.82efg	0.577 ± 0.04cdefg
	M4	54.07 ± 2.39fghi	328.43 ± 20.46defg	0.836 ± 0.02ghi	32.97 ± 2.40fgh	0.553 ± 0.03efgh
S2	M1	62.13 ± 2.85a	375.47 ± 12.68a	0.912 ± 0.02a	41.07 ± 2.62a	0.677 ± 0.04a
	M2	60.21 ± 1.55abc	358.83 ± 17.64abc	0.895 ± 0.01ab	39.87 ± 2.30ab	0.653 ± 0.04ab
	M3	59.20 ± 2.33abcd	347.83 ± 22.84abcde	0.878 ± 0.01bcde	38.83 ± 2.51abc	0.633 ± 0.04abc
	M4	57.23 ± 2.38cdef	337.97 ± 16.81cdef	0.844 ± 0.02fghi	37.73 ± 2.17abcde	0.617 ± 0.05abcde
S3	M1	61.77 ± 2.30ab	372.97 ± 17.23ab	0.910 ± 0.01a	40.37 ± 2.54ab	0.680 ± 0.04a
	M2	59.93 ± 2.07abc	359.47 ± 13.00abc	0.892 ± 0.02abc	39.30 ± 2.49abc	0.643 ± 0.05abc
	M3	58.70 ± 2.72abcde	345.43 ± 13.57bcde	0.873 ± 0.02bcdef	38.17 ± 2.62abcd	0.630 ± 0.04abcd
	M4	57.27 ± 1.65cdef	334.87 ± 19.37cdefg	0.841 ± 0.01ghi	37.63 ± 2.67abcde	0.613 ± 0.06abcde
S4	M1	59.13 ± 2.63abcd	342.83 ± 14.35cde	0.881 ± 0.02abcd	38.90 ± 1.18abc	0.623 ± 0.05abcd
	M2	58.20 ± 2.72bcde	333.03 ± 18.74cdefg	0.867 ± 0.03bcdefg	37.73 ± 2.70abcde	0.590 ± 0.05bcdefg
	M3	57.50 ± 2.13cdef	324.10 ± 17.01efg	0.861 ± 0.02cdefg	36.47 ± 2.48bcdef	0.587 ± 0.04bcdefg
	M4	55.17 ± 2.76efgh	314.50 ± 19.61fgh	0.844 ± 0.02fghi	35.50 ± 1.95cdef	0.563 ± 0.03defg
S5	M1	56.00 ± 1.97defg	322.73 ± 22.73efg	0.847 ± 0.02efgh	34.70 ± 2.43defg	0.577 ± 0.03cdefg
	M2	54.40 ± 2.35fghi	307.27 ± 7.98ghi	0.820 ± 0.01hij	33.77 ± 2.95efg	0.553 ± 0.04efgh
	M3	52.87 ± 3.19ghij	294.67 ± 16.55hij	0.812 ± 0.02ijk	32.57 ± 1.70fgh	0.537 ± 0.04fghi
	M4	50.97 ± 2.47ijk	279.60 ± 17.45ij	0.798 ± 0.02jkl	31.37 ± 4.56ghi	0.523 ± 0.03ghi
S6	M1	51.83 ± 2.36hijk	293.03 ± 16.55hij	0.801 ± 0.02jkl	32.77 ± 2.27fgh	0.490 ± 0.04hij
	M2	49.60 ± 2.65jkl	282.70 ± 24.60ij	0.781 ± 0.02klm	29.50 ± 2.05hij	0.473 ± 0.04ij
	M3	48.67 ± 2.40kl	277.57 ± 12.95j	0.773 ± 0.02lm	27.93 ± 2.55ij	0.453 ± 0.05j
	M4	46.87 ± 2.31l	270.63 ± 23.07j	0.752 ± 0.04m	26.23 ± 2.71j	0.423 ± 0.04j

2.4 播期和密度对光合特性的影响

同一密度下(表 3),随播期的推迟小麦叶片光合速率、气孔导度和蒸腾速率呈先增加后下降的趋势,并以 S2 和 S3 播期的最高,而胞间 CO₂浓度呈先降低后增加的趋势,并以 S2 和 S3 播期的最低,且同一密度下 S2 和 S3 间的差异皆不显著。在 M2 下, S2 比 S1 和 S6 的光合速率、气孔导度和蒸腾速率分别增加了 17.1%, 8.1%, 10.8% 和 107.7%, 66.6%, 42.2%, 胞间 CO₂浓度分别降低了 13.6% 和

21.5%, 且差异大多数显著。在同一播期下,随种植密度的增加,小麦叶片光合速率、气孔导度和蒸腾速率逐渐降低,而胞间 CO₂浓度逐渐增加,在 S2 和 S3 下, M1 比 M4 的光合速率、气孔导度和蒸腾速率分别增加了 21.3%, 8.8%, 6.1% 和 23.5%, 8.2%, 5.9%, 而胞间 CO₂浓度分别降低了 9.4% 和 10.3%, 且部分差异达到显著水平。因此可以得出,正常播种和适度晚播有利于改善小麦的光合特性,而增加种植密度不利于小麦光合特性的改善。

表 3 播期和密度对小麦灌浆中期光合特性的影响

Tab. 3 Effect of sowing date and planting density on wheat photosynthetic characteristics at middle of filling stage

播期 Sowing date	密度 Density	光合速率 /($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Photosynthetic rate	气孔导度 /($\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Stomatal conductance	胞间 CO ₂ 浓度 /($\mu\text{mol}/\text{mol}$) Intercellular CO ₂ concentration	蒸腾速率 /($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Transpiration rate
S1	M1	17.58 ± 1.72bcde	0.460 ± 0.02abcd	252.23 ± 22.75defgh	4.65 ± 0.28cdef
	M2	16.97 ± 1.24bedef	0.447 ± 0.03cde	257.47 ± 9.25cdefg	4.44 ± 0.33efgh
	M3	15.77 ± 1.52defg	0.433 ± 0.02def	266.13 ± 18.15cde	4.27 ± 0.23ghi
	M4	13.92 ± 3.38fgh	0.403 ± 0.02fg	277.93 ± 21.17abcd	4.14 ± 0.21hij
S2	M1	21.33 ± 1.14a	0.497 ± 0.03a	211.90 ± 13.78j	5.06 ± 0.17a
	M2	19.88 ± 1.36ab	0.483 ± 0.03abc	222.33 ± 20.81ij	4.92 ± 0.19abc
	M3	18.99 ± 2.93abc	0.467 ± 0.02abcd	228.73 ± 15.58hij	4.85 ± 0.18abcd
	M4	17.58 ± 2.81bcde	0.457 ± 0.02bcd	233.83 ± 13.66ghij	4.77 ± 0.19abcde
S3	M1	21.52 ± 2.19a	0.490 ± 0.02ab	213.23 ± 20.16j	5.02 ± 0.24ab
	M2	19.91 ± 2.21ab	0.480 ± 0.03abc	223.93 ± 21.97ij	4.98 ± 0.23abc
	M3	18.86 ± 1.53abcd	0.463 ± 0.03abcd	230.47 ± 22.37ghij	4.82 ± 0.19abcd
	M4	17.42 ± 2.85bcde	0.453 ± 0.03bcd	237.63 ± 18.48fghij	4.74 ± 0.23abcdef
S4	M1	18.65 ± 1.40abcd	0.470 ± 0.02abcd	232.53 ± 21.44ghij	4.84 ± 0.16abcd
	M2	17.66 ± 2.22bcde	0.447 ± 0.02cde	249.00 ± 14.87efghi	4.69 ± 0.18bcdef
	M3	16.32 ± 2.12cdef	0.433 ± 0.03def	257.83 ± 21.27cdefg	4.55 ± 0.21defg
	M4	14.73 ± 1.54efgh	0.413 ± 0.02efg	263.53 ± 12.36cdef	4.39 ± 0.23fghi
S5	M1	15.27 ± 2.05efg	0.410 ± 0.03efg	253.83 ± 13.30defgh	4.29 ± 0.25ghi
	M2	14.29 ± 1.87fgh	0.383 ± 0.02gh	266.77 ± 9.50cde	4.07 ± 0.25ijk
	M3	12.73 ± 1.22gh	0.360 ± 0.02hi	275.17 ± 10.27bcde	3.88 ± 0.14jkl
	M4	11.88 ± 1.88hi	0.337 ± 0.02i	283.17 ± 9.89abc	3.63 ± 0.19lmn
S6	M1	11.97 ± 1.34hi	0.327 ± 0.03ij	271.73 ± 8.17bcde	3.76 ± 0.12klm
	M2	9.57 ± 0.91ij	0.290 ± 0.02jk	283.27 ± 15.45abc	3.46 ± 0.20mn
	M3	9.46 ± 1.05ij	0.273 ± 0.02k	297.30 ± 12.10ab	3.38 ± 0.16n
	M4	8.68 ± 1.46j	0.253 ± 0.02k	305.07 ± 14.60a	3.29 ± 0.15n

2.5 播期和密度对产量的影响

2 年试验结果表明(图 2),在同一密度下,随播期的推迟小麦产量呈先增加后下降的趋势,并以 S2 和 S3 播期的最高,且两播期间差异不显著。在同一密度 M1、M2、M3 和 M4 下, S3 比 S1 和 S6 的产量在 2010 - 2011 年分别增加了 12.1%, 11.8%, 14.0%, 13.9% 和 73.6%, 72.0%, 75.4%, 72.8%, 在 2011 - 2012 年分别增加了 14.1%, 14.3%, 9.8%, 6.4% 和 73.3%, 75.7%, 73.9%, 69.5%, 且差异显著。在同一播期下,小麦产量皆以 M1 和 M2 密度下的产量最

高,且两密度间差异不显著。在同一播期 S1、S2、S3、S4、S5 和 S6 下, M2 比 M4 的产量在 2010 - 2011 和 2011 - 2012 年分别增加了 10.5%, 9.7%, 8.5%, 10.5%, 8.3%, 9.0% 和 8.7%, 19.1%, 16.8%, 7.8%, 9.2%, 12.7%, 且差异绝大多数显著。从图中亦可看出,2010 - 2011 和 2011 - 2012 年高产播期密度组合皆为 S2M1、S2M2、S3M1、S3M2,其产量分别为 7 892.8, 7 978.6, 7 996.2, 8 020.6 kg/hm² 和 7 911.5, 7 978.6, 7 970.1, 8 032.9 kg/hm² (各组合产量间差异不显著)。

2.6 相关性分析

从图3可以看出,小麦叶面积指数与产量(2年平均)呈二次抛物线的关系($R^2 = 0.74$),说明适宜的叶面积指数有利于提高小麦产量,而叶面积指数过

高和过低都不利于产量的提高。小麦叶片叶绿素含量、光合速率和实际光化学效率皆与产量呈直线正相关关系(决定系数 R^2 皆大于0.7),从侧面证明了植株光合特性的改善,对提高作物产量具有积极的作用。

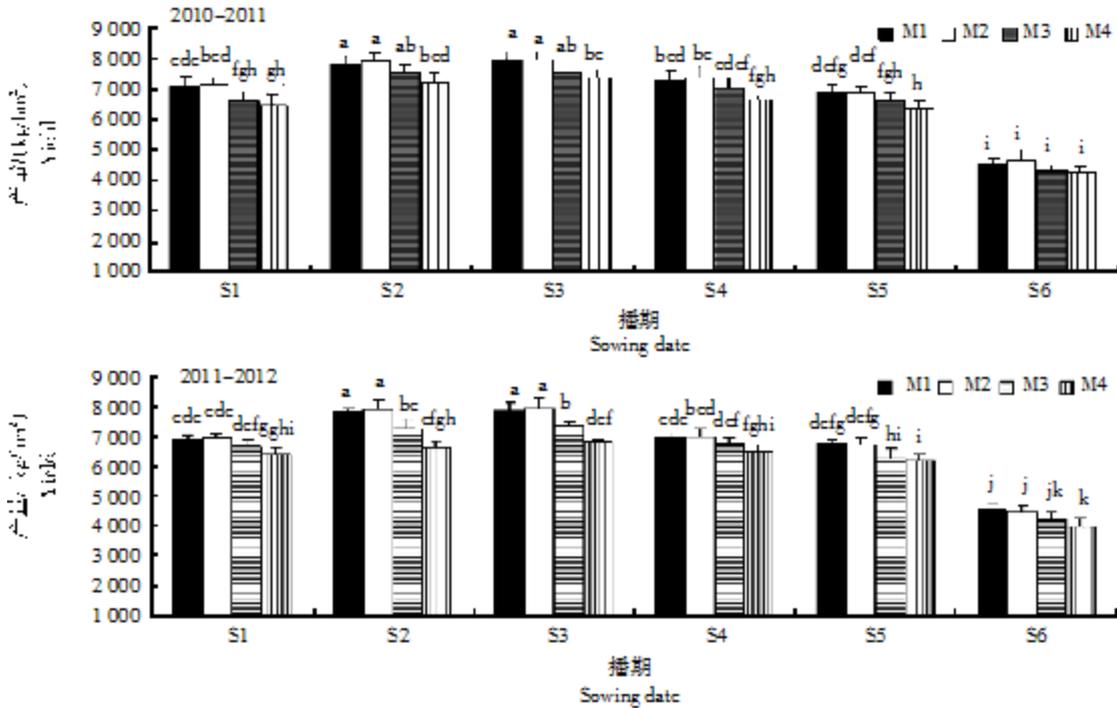


图2 播期和密度对小麦产量的影响

Fig. 2 Effect of sowing date and planting density on yield of wheat

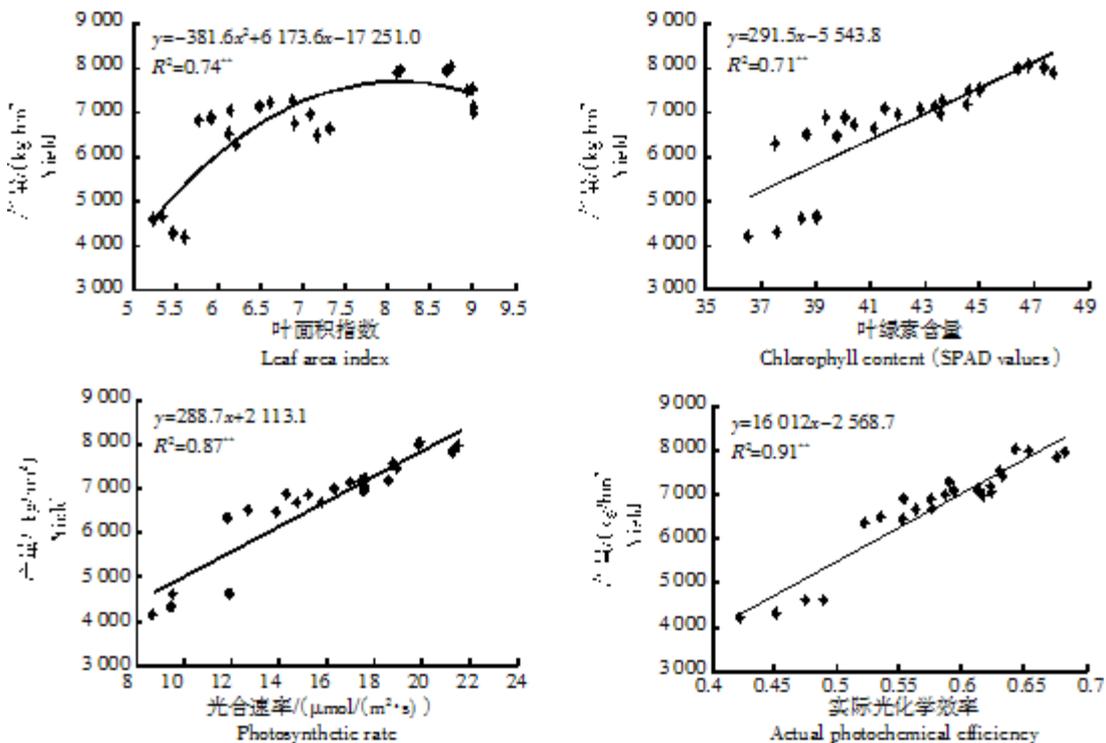


图3 叶面积指数、叶绿素含量、光合速率、实际光化学效率与产量间的相关性分析

Fig. 3 Correlation matrix among leaf area index, chlorophyll content, photosynthetic rate, actual photochemical efficiency and yield

3 讨论与结论

叶面积的大小及动态变化可反映作物群体光能利用状况,群体适宜的叶面积指数有利于提高作物群体光合能力,并最终导致产量的差异^[12]。陈素英等^[13]在研究中不仅发现小麦冠层截获的光合有效辐射与叶面积指数在一定范围内呈显著正相关,而且发现叶面积指数随种植密度的增加而增大,随播期的推迟而降低。本研究发现,正常播种(10月10日)和适度晚播(10月17日)有利于提高小麦群体的叶面积指数,且同一播期下小麦叶面积指数随种植密度的增加而增加。早播和过度晚播会降低小麦叶面积指数主要是由于早播小麦容易发生冻害和后期倒伏^[14],而晚播不利于小麦生长发育与光、温、水等生态环境条件的协调^[15]。虽然增加种植密度可明显增加作物叶面积指数,但叶面积指数偏大不利于作物高产,因此,为使作物群体保持适宜的叶面积指数,应考虑到播期和密度的综合效应。小麦叶片叶绿素含量的高低直接影响着光合速率和光合产物的积累,提高小麦功能叶片叶绿素含量与提高小麦产量密切相关^[16]。杨桂霞等^[17]通过研究证实,小麦叶绿素含量受到播期的明显影响,且不同密度处理间差异不显著。本研究不仅发现小麦不同生育期的叶绿素含量随播期的推迟呈先增加后下降的趋势,而且发现低密度和正常播种及适度晚播有利于提高小麦的叶绿素含量。李宁等^[18]通过研究同样证实2个夏玉米品种的穗位叶片叶绿素含量在同一播期内为高密度处理低,播期间比较以适期播种处理的高。

叶绿素荧光可以快速、灵敏和无损伤地研究和探测完整植株在不同环境下光合作用的真实行为,经常被用于评价光合机构的功能和环境变化对其的影响^[19-20]。本研究发现,同一密度下小麦叶片初始荧光 F_0 、最大荧光 F_m 、最大光化学效率 F_v/F_m 、电子传递速率 ETR 和实际光化学效率 Φ_{psII} 皆以正常播种和适度晚播的最高,且同一播期下上述各荧光参数皆随种植密度的增加而降低。李宁等^[21]在研究中同样指出,不同播期和密度对不同穗型小麦品种的叶绿素荧光存在明显影响。光合作用是小麦干物质积累和产量形成的基础,改善光合作用对于提高小麦生产力及籽粒产量具有重要意义^[3,22]。本研究发现,正常播种和适度晚播有利于提高小麦叶片光合速率、气孔导度和蒸腾速率而降低胞间 CO_2 浓度,增加种植密度会降低小麦叶片光合速率、气孔导度和蒸腾速率而增加胞间 CO_2 浓度。李宁等^[23]在另

一研究中同样发现,播期和密度组合对小麦旗叶光合特性存在明显影响,两小麦品种的旗叶光合特性均以适期播种和低密度下表现最优。播期和密度对小麦叶绿素荧光和光合特性的影响主要可能是由于播期和密度改变了小麦生长发育阶段的光、温、水等生态环境条件及小麦植株个体的生长发育状态。

播期和密度是影响小麦产量形成的2个重要因素,如蒋会利^[24]在研究中不仅发现适宜的播期和密度有利于提高小麦产量,而且发现播期对小麦产量的影响要大于密度。本研究发现,同一密度下小麦产量皆以正常播种10月10日和适度晚播10月17日的最高,同一播期下皆以合理密度基本苗120万和210万的产量最高。正常播种和适度晚播及合理的密度能提高小麦的产量主要是由于小麦适期播种可以充分利用冬前光热资源,培育壮苗,适宜的种植密度有利于缓解个体与群体的矛盾,建立合理的群体结构,利于穗数、穗粒数和粒重的协调发展^[25-30]。相关分析表明,叶面积指数与产量呈二次抛物线的关系,叶绿素含量、光合速率、实际光化学效率皆与产量呈直线正相关关系,从侧面再次证实了光合效能的改善对提高作物产量具有重要的作用。

适期播种和增加种植密度可提高小麦群体叶面积指数,但实际农业生产中应采取合理的播期和密度组合以使作物群体保持适宜的叶面积指数,进而改善作物群体有效光合面积和光合效率。小麦叶绿素含量和各叶绿素荧光参数 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 、ETR、 Φ_{psII} 皆以正常播种10月10日和适度晚播10月17日的最高,并随密度的增加而降低。正常播种和适度晚播相对于偏早播和过度晚播明显提高了小麦叶片光合速率、气孔导度和蒸腾速率,增加种植密度则降低了叶片光合速率、气孔导度和蒸腾速率。播期和密度可通过对作物群体光合效应及有效光合面积的影响进而对产量产生影响。烟农19的高产播期密度组合为S2D1、S2D2、S3D1和S3D2。安徽淮北地区半冬性小麦的推荐播期为10月10-17日,强分蘖力小麦的推荐密度为基本苗120~210万株/hm²。由于小麦光合效应和产量受多种因素的影响,因此,关于播期和密度对小麦光合效应及产量的影响仍需进一步深入探讨,以充分挖掘小麦高产潜力。

参考文献:

- [1] 王磊,张彤,丁圣彦. 干旱和复水对不同倍性小麦光合生理生态的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1593-1600.
- [2] 谭飞泉,蒋华仁,任正隆. 早播对四川盆地小麦新品系

- J210 生育进程、籽粒灌浆特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1): 122 - 127.
- [3] 彭正萍, 李春俭, 门明新. 缺磷对不同穗型小麦光合生理特性和产量的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 739 - 744.
- [4] 闰翠萍, 张永清, 张定一, 等. 播期和种植密度对强、中筋冬小麦蛋白质组分及品质性状的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1733 - 1740.
- [5] 徐兆飞, 张惠叶, 张定一. 小麦品质及其改良[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 42 - 63.
- [6] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(5): 537 - 541.
- [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 Environ*, 2013, 59(2): 80 - 88.
- [8] 刘瑞显, 王友华, 陈兵林, 等. 花铃期干旱胁迫下氮素水平对棉花光合作用与叶绿素荧光特性的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(4): 675 - 683.
- [9] 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]. *Eur J Plant Pathol*, 2013, 136(2): 301 - 315.
- [10] 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.
- [11] 李朝霞, 赵世杰, 孟庆伟, 等. 不同粒叶比小麦品种非叶片光合器官光合特性的研究[J]. 作物学报, 2004, 30(5): 419 - 426.
- [12] 安强, 李宏伟, 李春莲, 等. 小麦叶面积指数的遗传变异及其影响因素与产量的关系[J]. 西北农业学报, 2011, 20(12): 46 - 53.
- [13] 陈素英, 张喜英, 毛任钊, 等. 播期和播量对冬小麦冠层光合有效辐射和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 681 - 685.
- [14] 裴雪霞, 王姣爱, 党建友, 等. 基因型和播期对优质小麦生长发育及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1109 - 1115.
- [15] 张珂, 孟丽梅, 杨子光, 等. 播期对小麦新品种‘洛麦22’生育规律影响研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(18): 36 - 39.
- [16] 白志英, 李存东, 孙红春, 等. 干旱胁迫对小麦叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响及染色体调控[J]. 华北农学报, 2009, 24(1): 1 - 6.
- [17] 杨桂霞, 赵广才, 许轲, 等. 播期和密度对冬小麦籽粒产量和营养品质及生理指标的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 687 - 692.
- [18] 李宁, 翟志席, 李建民, 等. 播期与密度组合对夏玉米群体源库关系及冠层透光率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 959 - 964.
- [19] Guarini J M, Moritz C. Modelling the dynamics of the electron transport rate measured by PAM fluorimetry during rapid light curve experiments[J]. *Photosynthetica*, 2009, 47(2): 206 - 214.
- [20] Yordanov I, Velikova V, Tsonev T. Influence of drought, high temperature and carbamide cytokinin 4-PU-30 on photosynthetic activity of bean plants. 1. Changes in chlorophyll fluorescence quenching[J]. *Photosynthetica*, 1999, 37(3): 447 - 457.
- [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] 王维, 韩清芳, 吕丽霞, 等. 不同耕作模式对旱地小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 20 - 26.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 郝有明, 李岩华, 霍成斌. 播期播量对冬小麦产量及产量构成因素的影响[J]. 山西农业科学, 2011, 39(5): 422 - 424, 473.
- [26] 王宙, 麻慧芳. 不同播期对小麦产量与品质的影响[J]. 山西农业科学, 2007, 35(3): 36 - 38.
- [27] 姜丽娜, 赵艳岭, 邵云, 等. 播期播量对豫中小麦生长发育及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2011, 40(5): 42 - 46.
- [28] 张凯, 李巧珍, 王润元, 等. 播期对春小麦生长发育及产量的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 324 - 331.
- [29] 杨健, 张保军, 毛建昌, 等. 播期与密度对冬小麦西农9871籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(3): 529 - 534.
- [30] Dornbusch T, Baccar R, Watt J, *et al.* Plasticity of winter wheat modulated by sowing date, plant population density and nitrogen fertilisation; Dimensions and size of leaf blades, sheaths and internodes in relation to their position on a stem[J]. *Field Crop Res*, 2011, 121(1): 116 - 124.