植物营养与肥料学报 2012,18(1):27-34
Plant Nutrition and Fertilizer Science

花后小麦叶面积指数与光合和产量关系的研究

王成雨,代兴龙,石玉华,曹 倩,门洪文,贺明荣*
(作物生物学国家重点实验室,山东农业大学农学院,山东泰安 271018)

摘要:以大穗型品种泰农18(T18)和中穗型品种山农15(S15)为材料,采用裂区设计,主区设置180 kg/hm^{2}和240 kg/hm^{2}两个氮肥水平(纯氮),裂区设置75×10^{4}株/hm^2,150×10^{4}株/hm^{2}和225×10^{4}株/hm^{2}三个种植密度,研究了叶面积指数与冬小麦光合和产量的关系。结果表明:冬小麦下部叶片叶面积指数(LLAI,倒4叶和倒5叶之和)与群体净光合速率(CAP)和产量呈极显著的正相关关系;从开花到花后14 d之前,上部叶片叶面积指数(TLAI,旗叶、倒2叶和倒3叶之和)和全部叶面积指数(WLAI,下部叶片和上部叶片之和)与群体净光合速率(CAP)和产量并不呈必然的显著正相关关系(T18显著正相关,S15相关不显著),但花后14d至成熟期,两个品种的TLAI和WLAI均与群体净光合速率(CAP)和产量呈显著的正相关关系。氮肥水平和种植密度对产量存在显著的互作效应,无论是大穗型品种T18还是中穗型品种S15都可以通过适当增加密度(T18以225×10^{4}株/hm^{2}为宜,S15以150×10^{4}株/hm^{2}为宜),降低氮肥用量(180 kg/hm^2)实现高产。

关键词:冬小麦;氮肥水平;种植密度;冠层;光合;产量
中图分类号:S512.1.01　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2012)01-0027-08

Effects of leaf area index on photosynthesis and yield of winter wheat after anthesis

WANG Cheng-yu, DAI Xing-long, SHI Yu-hua, CAO Qian, MEN Hong-wen, HE Ming-rong*
(*National Key Laboratory of Crop Biology/College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China*)

Abstract: Leaf is the main tissue of photosynthesis for green plant. Leaf area is closely correlated with the grain yield of crops. To make clear the effects of leaf area index on photosynthesis and yield of winter wheat after anthesis, and to provide a theoretical basis for winter wheat cultivation with high and stable grain yield, Tainong18 (T18), a winter wheat cultivar with multi-grain number per spike, and Shannong15 (S15), a winter wheat cultivar with middle grain number per spike, were used as experimental materials. The two cultivars were both widely grown. Field trials were carried out from 2008 to 2010 in two successive growth seasons in a split plot design, with 2 nitrogen rates (180 kg/ha and 240 kg/ha of pure nitrogen) being in the main plot and 3 plant densities (0.75, 1.50 and 2.25 million basic seedlings per hectare) representing in the subplots. The results showed that lower leaf area index (LLAI, the third leaves and the forth leaves under the flag leaves on the stems) is positively and significantly correlated with canopy apparent photosynthesis (CAP) and grain yields during the lower leaf stay-green stage, and the top leaf area index (TLAI, flag leaves, the first leaves and the second leaves under the flag leaves on the stems) and whole leaf area index (WLAI) which consists of all of the leaves on the stems are positively significantly correlated with CAP and grain yield for T18 but not for S15 so the relationships are not certain within 14 days after anthesis. TLAI and WLAI are positively and significantly correlated with CAP and grain yields for two kind of wheat from 14 days after anthesis to maturity. There is a significant interaction between nitrogen rate and plant density on grain yield. Being reducing nitrogen amount from 240 kg/ha to 180 kg/ha of pure nitrogen, both T18 which adopts 2.25 million basic seedlings per hectare and S15 which adopts 1.50 million basic seedlings per

收稿日期:2011-05-30　　**接受日期**:2011-10-30
基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2009CB118602);公益性行业(农业)科研专项(201103030)资助。
作者简介:王成雨(1977—),男,山东梁山人,博士研究生,主要从事小麦生理生态研究。E-mail:wangcy523@163.com
* 通讯作者 E-mail:mrhe@sdau.edu.cn

hectare could gain high grain yields.

Key words: winter wheat; nitrogen rate; plant density; canopy; photosynthesis; grain yield

叶片是光合作用的主要器官,叶面积对小麦产量形成具有较大的影响[1]。叶面积的差异可以影响植株空间分布和群体内微环境[2-5],进而对光能利用分配和群体的光合效率起着决定性作用[6]。研究认为,氮素是实现小麦高产的关键营养元素之一,增施氮肥有利于增加小麦叶面积,改善冠层结构,提高小麦产量[7],但过量施氮则使叶倾角变小,叶面积过大,不利于合理冠层结构的构建,导致小麦产量降低[8-9]。密度也是影响小麦产量的关键因素,密度过低会导致穗数不足,叶面积指数过小,冠层对光的截获量不足,透光率过大,光合产物合成总量过低,子粒产量下降[10-11];密度过大,则个体变弱,冠层通风透光条件变差,易发生病害和倒伏,子粒产量亦下降[12]。除氮肥水平和种植密度外,合理的灌水方式、行距配置、耕作方式均有助于作物塑造合理的冠层结构,进而获得较高的子粒或生物产量[13-15]。

前人研究表明,小麦子粒产量的70%～80%来自于开花后冠层光合作用的产物且大部分由上三叶贡献[16-18],而对于花后下部叶片与光合和子粒产量的关系缺乏研究。为此,本研究探讨了氮肥和密度互作条件下两种不同穗型小麦品种花后上部叶片、下部叶片和全部叶片与光合和产量的关系,以期为小麦高产高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2008～2009和2009～2010连续2年在泰安市大汶口镇小侯村进行。试验地前茬作物为玉米,一年两熟种植,多年秸秆还田。试验地土壤类型为壤土。播前0—20 cm和20—40 cm土层土壤有机质含量分别为17.9 g/kg和11.39 g/kg,全氮1.139 g/kg和0.749 g/kg,碱解氮88.81 mg/kg和47.94 mg/kg,速效磷90.36 mg/kg和5.41 mg/kg,速效钾83.42 mg/kg和56.09 mg/kg。试验点属温带大陆性季风气候区,年均太阳辐射总量为121.5 kcal/cm^2,年均日照数2627.1 h;年平均气温12℃,年平均≥0℃的积温4731℃,≥10℃的积温4213℃,无霜期平均为195 d;年均降水697.0 mm,小麦生长季平均降水量为180.0 mm。

1.2 试验设计

供试品种为大穗型小麦品种泰农18(T18)和中穗型小麦品种山农15(S15),两品种的灌浆期分别约为42 d和35 d。于2008年10月10日和2009年10月10日播种。试验采用裂区设计,主区设N 180 kg/hm^{2}和240 kg/hm^{2}两个施氮水平(纯氮),分别用N1和N2表示;副区设三个种植密度,即基本苗75 × 10^4 株/hm^2,150 × 10^4 株/hm^{2}和225 × 10^4 株/hm^2,分别用D1,D2和D3表示。氮肥以3∶7的比例分别于耕前施用和拔节期开沟施用,氮肥品种为尿素。每个品种6个处理,共12个处理,每处理重复3次,小区面积为4.3 ×8 m^2。

除氮肥外,施入磷肥(P_2O_5)120 kg/hm^2,品种为过磷酸钙;钾肥(K_2O)105 kg/hm^2,为氯化钾,均以基肥的形式于翻地前一次性施入。各处理均分别于越冬期、拔节期和开花期灌水60 mm,采用水表精确控制灌水量,水源为当地地下水。其余管理措施同一般高产大田。

1.3 测定方法

叶面积指数的测定:从开花期开始,每隔7d取样1次。于每处理长势均匀处连续取50个单茎,从茎秆基部依次用直尺量取不同叶位叶片的长和宽,计算叶面积(长×宽×0.83)。旗叶、倒2叶和倒3叶称为上部叶片,倒4叶和倒5叶称为下部叶片,上部叶片和下部叶片之和称为全部叶片,分别计算上部叶片叶面积指数(Top leaf area index, TLAI),下部叶片叶面积指数(Lower leaf area index, LLAI)和全部叶片叶面积指数(Whole leaf area index, WLAI)。

群体净光合速率(Canopy apparent photosynthesis, CAP)的测定:参照董树亭[19]的方法,采用GXH-305型红外线CO_2分析仪测定。同化箱60 cm×90 cm×120 cm,聚酯薄膜密封(透光率95%),内置2个风扇,用于混匀空气和温度,上午8:30～11:00自然光照条件下测定。

产量的测定:于成熟期调查成穗数,每个小区收获3m^2,收获后植株脱粒晒干后测定产量。

1.4 数据处理和统计分析

2008～2010年两个生长季的试验结果基本一致,本文主要以2009～2010年的结果进行分析。采用DPS分析软件对有关数据进行统计分析和差异显著性检验,用Originpro 8软件作图。

2　结果与分析

2.1　氮肥水平和种植密度对小麦叶面积指数的影响

2.1.1　对上部叶片叶面积指数的影响　从图 1 可以看出，开花到开花后 14d 之前，两个品种 TLAI 均随密度和氮肥施用量的增加而增大。对于大穗型品种 T18，开花后 14d 至成熟，在低氮水平条件下，TLAI 随密度的增加而增加；在高氮水平下，TLAI 随密度的增加先增加后降低；在低密度和中密度条件下，高氮水平的 TLAI 显著高于低氮水平，高密度条件下则相反。对于中穗型品种 S15，开花后 14 d 至成熟，在同一氮肥水平条件下，TLAI 随密度的增加先增加后降低；在低密度条件下，高氮水平的 TLAI 显著高于低氮水平，中密度和高密度条件 TLAI 变化趋势与低密度条件下相反。品种间相比较，大穗型品种 T18 从开花到花后 14d 的 TLAI 虽然小于中穗型品种 S15，但 T18 的 TLAI 稳定时间长于 S15。

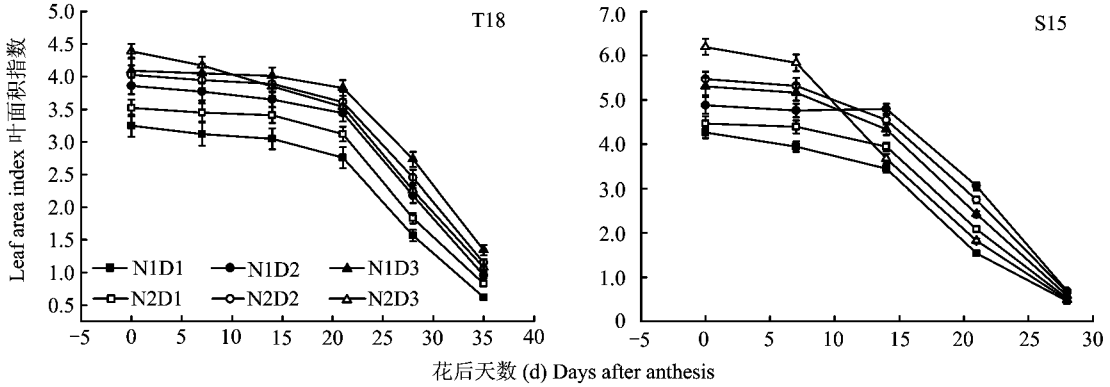

图 1　氮肥水平和种植密度对上部叶片叶面积指数的影响

Fig. 1　Effects of nitrogen rates and plant densities on top leaf area index of wheat

2.1.2　对下部叶片叶面积指数的影响　图 2 显示，对于大穗型品种 T18，在低氮水平下，LLAI 随密度的增加而增加，在高氮水平下，LLAI 随密度的增加先增加后降低；在低密度和中密度条件下，LLAI 随氮肥水平的增加而增加，高密度条件下则相反。中穗型品种 S15，在同一氮肥水平下，LLAI 随密度的增加先升高后降低；在低密度条件下，LLAI 随氮肥水平的增加而增加，中密度和高密度条件下相反。品种间相比较，仅在开花期中穗型品种 S15 的 LLAI 大于大穗型品种 T18，LLAI 的稳定时间也比 T18 短 1 周。

2.1.3　对全部叶片叶面积指数的影响　氮肥水平和密度对全部叶片叶面积指数（WLAI）的影响与对上部叶片叶面积指数（TLAI）的影响趋势基本一致（图 3）。

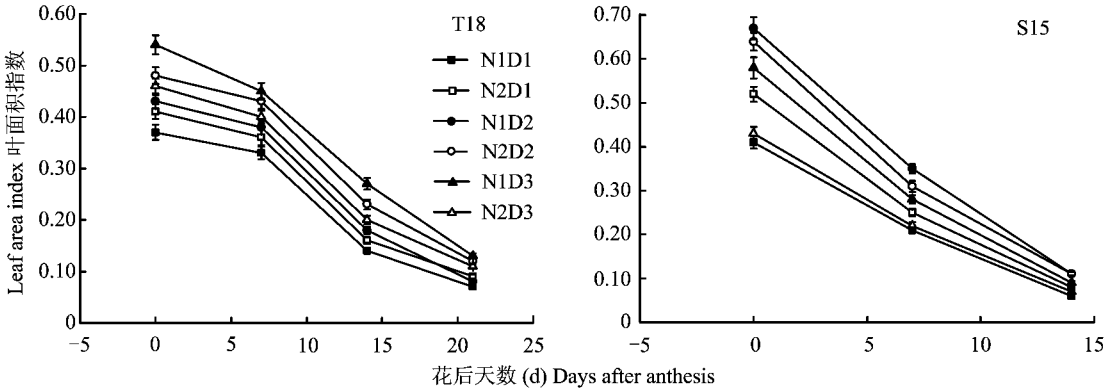

图 2　氮肥水平和种植密度对下部叶片叶面积指数的影响

Fig. 2　Effects of nitrogen rates and plant densities on lower leaf area index of wheat

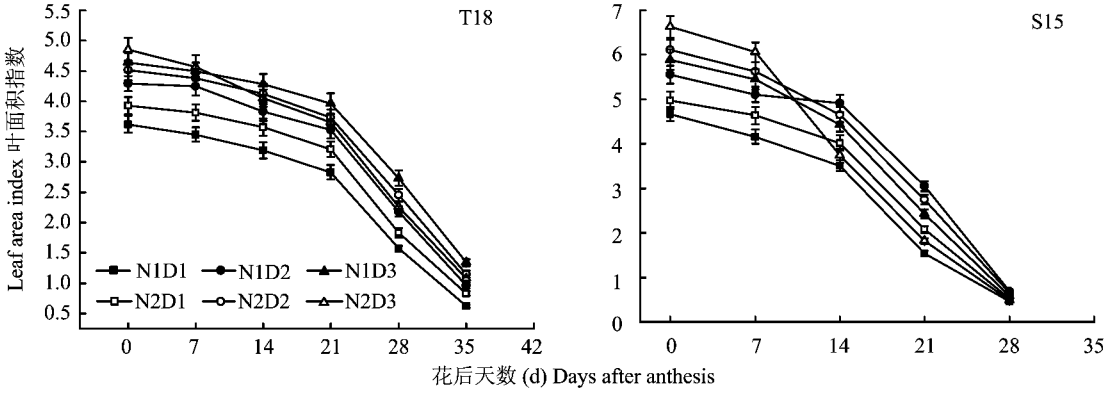

图3 氮肥水平和种植密度对全部叶面积指数的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen rates and plant densities on whole leaf area index of wheat

2.2 氮肥水平和种植密度对群体净光合速率的影响

由图4可知,对于大穗型品种T18,在低氮水平下,群体净光合速率(CAP)随密度的增加而增加,在高氮水平下,CAP随密度的增加先增加后降低;在低密度和中密度条件下,CAP随氮肥水平的增加而增加,高密度条件下相反。对于中穗型品种S15,在同一氮肥水平下,CAP随密度的增加先升高后降低;在低密度条件下,CAP随氮肥水平的增加而增加,中密度和高密度条件下相反。两品种间的CAP差异较小,但T18的CAP持续时间比S15长约1周。

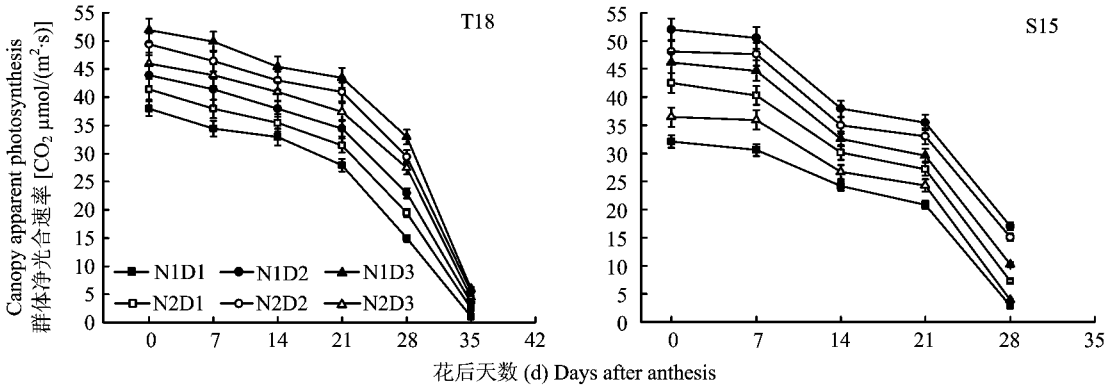

图4 氮肥水平和种植密度对群体净光合速率的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen rates and plant densities on canopy apparent photosynthesis (CAP) of wheat

2.3 氮肥水平和播种密度对冬小麦产量的影响

从表1可以看出,对于两个品种,在同一氮肥水平下,单位面积穗数均随密度的增加而增加,穗粒数和千粒重随密度的增加而降低;在同一密度下,单位面积穗数和穗粒数随氮肥水平的增加而增加,千粒重随氮肥水平的增加而降低。但两个品种的产量对氮肥水平和播种密度的反应不同,大穗型品种T18在低氮水平下产量随密度的增加而增加,在高氮水平下产量先增加后降低;在低密度和中密度条件下产量随氮肥水平的增加而增加,在高密度条件下则相反。对于中穗型品种S15来说,在同一氮肥水平下产量随密度的增加先增加后降低;在低密度条件下产量随氮肥水平的增加而增加,中密度和高密度条件下产量变化趋势与低密度条件下相反。大穗型品种T18的低氮高密度处理(N1D3),中穗型品种S15的低氮中密度处理(N1D2)产量最高,显著高于其它处理。

根据表1的产量结果,对不同处理氮密互作下的产量进行方差分析(表2)表明,施氮量和密度均能显著影响小麦的产量,而且氮肥和密度之间存在明显的互作效应。

2.4 叶面积指数、群体光合速率和产量之间的相关性分析

由表3可知,对于大穗型品种T18来说,产量与TLAI、LLAI、WLAI之间,群体净光合速率(CAP)与TLAI、LLAI、WLAI之间以及产量与CAP之间均呈显著或极显著的正相关关系。对于中穗型品种S15

表 1　氮肥水平和种植密度对冬小麦产量的影响

Table 1　Effects of nitrogen rates and plant densities on grain yield of winter wheat

品种 Cultivar	处理 Treatment	穗数 Spike number ($\times10^4$/ hm^2)	穗粒数 Kernels per spike (No./spike)	千粒重 Weight per 1000 kernels (g)	产量 Grain yield (kg/hm^2)
T18	N1D1	418.8 d	44.41 b	44.32 a	6701 e
	N1D2	472.5 c	43.92 c	43.90 b	7856 c
	N1D3	567.0 ab	42.75 e	43.16 c	8633 a
	N2D1	448.8 cd	45.32 a	43.26 c	7115 d
	N2D2	555.0 b	44.33 b	42.21 d	8534 ab
	N2D3	583.8 a	43.28 d	39.83 e	8321 b
S15	N1D1	534.9 f	34.23 ab	49.28 a	7217 e
	N1D2	668.5 d	33.01 b	47.77 b	8706 a
	N1D3	697.5 c	31.17 c	45.13 d	7870 c
	N2D1	563.1 e	34.88 a	49.02 a	7712 d
	N2D2	718.2 ab	30.03 c	47.02 c	8300 b
	N2D3	727.05 a	28.87 d	44.40 e	7250 e

注(Note): 同一列数据后相同字母表示处理间差异不显著 Values followed by different letters within a column are significantly different between treatments at the $P<0.05$.

表 2　小麦产量的方差分析

Table 2　Variance analysis for yield of wheat

品种 Cultivar	变异来源 Origin of variance	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	*F* 值 *F*-value	*P* 值 *P*-value
T18	氮肥 Nitrogen rate (N)	0.6198	1	0.6198	401.018**	0.0025
	密度 Density (D)	7.8364	2	3.9182	263.169**	0
	氮肥×密度 N×D	1.3175	2	0.6588	44.246**	0
S15	氮肥 Nitrogen rate (N)	0.1411	1	0.1411	76.885*	0.0128
	密度 Density (D)	3.9541	2	1.9771	66.714**	0
	氮肥×密度 N×D	1.0513	2	0.5256	17.737**	0.0011

注(Note): * 表示在5%水平差异显著 Significantly different at the 5% level; ** 表示在1%水平差异显著 Significantly different at the 1% level.

来说,开花到开花后 14 d 之前,产量与 TLAI、WLAI 之间,CAP 与 TLAI、WLAI 之间相关关系不显著,开花后 14 d 至成熟,上述相关关系均呈显著或极显著相关;产量与 LLAI 之间,CAP 与 LLAI 之间以及产量与 CAP 之间均呈显著或极显著的正相关关系。

3　讨论与结论

3.1　讨论

作物冠层对光的截获主要取决于叶面积指数的大小和叶面积的垂直分布[20],因而叶面积指数的大小和叶面积的垂直分布在一定程度上反映冠层对光的截获以及冠层对光能的转化能力。前人研究表明,随氮肥水平和种植密度的增加,小麦叶面积指数增加[21-22]。本研究结果表明,从开花至开花后 14 d 之前,两个穗型小麦品种全部叶片叶面积指数(WLAI)和上部叶片叶面积指数(TLAI)随氮肥水平和播种密度的增加而增加,这与前人研究结果相一致[21-22]。对于大穗型品种 T18 来说,开花后 14 d 至

表3 叶面积指数、群体光合和产量之间的相关性分析表

Table 3 The correlation of LAI, CAP and grain yield

项目 Index	品种 Cultivar	花后天数 Days after anthesis (d) 0	7	14	21	28	35
产量与 TLAI	T18	0.938**	0.967**	0.986**	0.977**	0.979**	0.983**
Yield and TLAI	S15	-0.027	0.092	0.975**	0.995**	0.983**	—
产量与 LLAI	T18	0.922**	0.968**	0.851**	0.888*	—	—
Yield and LLAI	S15	0.978**	0.949**	0.964**	—	—	—
产量与 WLAI	T18	0.941**	0.964**	0.973**	0.928**	0.866*	0.962**
Yield and LLAI	S15	0.087	0.218	0.953**	0.955**	0.983**	—
CAP 与 TLAI	T18	0.808*	0.899*	0.968**	0.965**	0.860*	0.958**
CAP and TLAI	S15	0.106	0.311	0.944**	0.996**	0.995**	—
CAP 与 LLAI	T18	0.983**	0.938**	0.813*	0.949**	—	—
CAP and TLAI	S15	0.948**	0.966**	0.978**	—	—	—
CAP 与 WLAI	T18	0.808*	0.913**	0.984**	0.963**	0.860*	0.958**
CAP and WLAI	S15	0.249	0.382	0.949**	0.896*	0.995**	—
产量与 CAP	T18	0.959**	0.970**	0.972**	0.969**	0.979**	0.983**
Yield and CAP	S15	0.957**	0.955**	0.982**	0.976**	0.923**	—

注(Note): TLAI—上部叶片叶面积指数 Top leaf area index; LLAI—下部叶片叶面积指数 Lower leaf area index; WLAI—全部叶片叶面积指数 Whole leaf area index; CAP—群体净光合速率 Canopy apparent photosynthesis. * 表示 5% 显著性 Denotes significantly different at the 5% probability, $R_{0.05}=0.8$; ** 表示 1% 显著性 Denotes significantly different at the 1% probability, $R_{0.01}=0.9$.

成熟的 WLAI 和 TLAI 以及下部叶片叶面积指数(LLAI)在低氮水平条件下,随密度的增加而增加,在高氮水平下,TLAI 随密度的增加先增加后降低;在低密度和中密度条件下,高氮水平 TLAI 显著高于低氮水平,高密度条件下相反。对于中穗型品种 S15,开花后 14 d 至成熟的 WLAI 和 TLAI 以及开花至衰亡的 LLAI,在同一氮肥水平条件下,随密度的增加先增加后降低;在低密度条件下,高氮水平显著高于低氮水平,中密度和高密度相反,这与前人的研究结论不相一致[21-22]。大穗型品种 T18 从开花到花后 14 d 的 WLAI 虽然小于中穗型品种 S15,但 T18 的 WLAI 稳定时间长于 S15,这主要是由于品种间的基因型差异所致[23]。

前人关于开花后叶面积指数、群体净光合速率(CAP)以及产量三者关系的研究较多。郭天财[24]等研究认为,群体光合速率与产量并没有达到显著正相关,但花后群体叶源量与产量正相关。本研究表明,对于大穗型品种 T18 和中穗型品种 S15 来说,产量均与群体光合呈显著或极显著的正相关关系,这与董树亭[19]的结论相一致。但不同的是,大穗型品种 T18 产量和群体净光合速率均与 TLAI、LLAI 和 WLAI 在整个灌浆期内均呈显著或极显著的正相关关系,而对于中穗型品种 S15 来说,在整个灌浆期内,产量和群体净光合速率仅与 LLAI 呈显著或极显著正相关关系,产量和群体净光合速率与 TLAI、WLAI 在开花至花后 14 d 之前并无显著的正相关关系,直到花后 14 d 之后,产量和群体净光合速率才与 TLAI、LLAI 和 WLAI 呈显著或极显著的正相关关系。这可能是从开花到花后 14d 在之前,中穗型品种 S15 群体叶源量较大,虽然群体光截获量增加,但光转化效率降低,群体光能利用率降低所致[25]。开花后 14d 至成熟,随着叶片的衰亡,叶源量变小,叶面积分布趋于合理,群体光合又逐步与叶面积趋于正相关。值得关注的是,不论是大穗型品种 T18 还是中穗型品种 S15,LLAI 和花后 14 d 至成熟期的 TLAI、WLAI 均与群体净光合速率和产量呈显著或极显著的正相关关系,这还有可能是因为开花至花后 14d,下部叶片作为根系代谢动力的源,对根系的吸收能力起着重要的调节作用[26-28],下部叶片叶面积指数过小,根系的吸收能力则较弱,进而对作为光

合作用主体的上部叶片起着制约作用。进一步分析认为，只有保持较大的下部叶片叶面积指数才能保证较强的根系活力，进而增强群体的光合速率。及至花后 14d 至成熟，下部叶片和冗余叶片受到 CO_2 和弱光的双重胁迫以及生育进程的不断推进逐渐衰亡[29]，上部叶片作为下部叶片的代偿对根系活力承担调节作用，因而此时上部叶片叶面积指数与群体光合和产量趋于正相关。因此，与单纯追求上部叶片叶面积指数相比，采取适当的栽培措施，增加灌浆期下部叶片叶面积指数和适当调控上部叶片叶面积，延长下部叶片叶面积持续期和灌浆中后期上部叶片叶面积持续期，可能对于改善小麦群体光合性能，提高净光合速率，增加产量更有意义。

作物产量由单位面积穗数、穗粒数和千粒重三因素共同决定[30]。对于两个品种来说，在同一氮肥水平下，单位面积穗数均随密度的增加而增加，穗粒数和千粒重随密度的增加而降低；在同一密度下，单位面积穗数和穗粒数随氮肥水平的增加而增加，千粒重随氮肥水平的增加而降低，这与王之杰等[11]和曹承富等[31]的研究相一致。大穗型品种 T18 在高氮水平下以及中穗型品种 S15 在两个氮肥水平下产量均表现为随密度的增加产量先增加后降低，说明穗数的增加不能带来产量的持续增加，这可能是因为单位面积穗数过大会导致子粒灌浆不充分，从而使千粒重降低[32]所致。两品种的群体光合速率的差异小于叶面积指数的差异（图 3 和图 4），T18 的群体光合持续时间相对长于 S15，但两品种的最高产量相差不大（T18 仅比 S15 低 0.8%，表 1），这可能是与中穗型品种花前贮藏物质向子粒转运率高于大穗型品种有关[23]。前人研究[31,33]结果表明，小麦高产适宜施氮量上限为 180 ～ 240 kg/hm^2，氮肥过低和过高均不利于获得高产。本研究表明，氮肥水平和种植密度对产量存在显著的互作效应，只要播种密度适宜（T18 种植密度为 225 ×10^4 株/hm^2，S15 种植密度为 150 ×10^4 株/hm^2），大穗型品种 T18 和中穗型品种 S15 均可在 180 kg/hm^2 施氮条件下获得高产。

本研究对氮肥水平和种植密度互作条件下冠层结构对群体光合与产量的影响进行了研究，至于根系与冠层结构以及根系与群体光合和产量的关系仍需进一步研究。

3.2　结论

群体净光合速率（CAP）和产量与小麦花后上部叶片叶面积指数（TLAI）和全部叶片叶面积指数（WLAI）并不呈必然的显著正相关关系，但与下部叶片叶面积指数（LLAI）呈极显著的正相关关系。大穗型品种泰农 18（T18）和中穗型品种山农 15（S15）均可在 180 kg/hm^2 的施氮条件下获得高产，其适宜的种植密度分别为 225 ×10^4 株/hm^2 和 150 ×10^4 株/hm^2。

参 考 文 献：

[1] Fageria N K, Baligar V C, Clark R B. Physiology of crop production [M]. New York: Food Products Press, 2005. 8-12.

[2] Cook R J, Ownley B H, Zhang H, Vakoch D. Influence of paired-row spacing and fertilizer placement on yield and root diseases of direct-seeded wheat[J]. Crop Sci., 2000, 40(4): 1079-1087.

[3] De Bruin J L, Pedersen P. Effect of row spacing and seeding rate on soybean yield [J]. Agron. J., 2008, 100: 704-710.

[4] Giunta F, Motzo R, Pruneddu G. Has long-term selection for yield in durum wheat also induced changes in leaf and canopy traits? [J]. Field Crop. Res., 2008, 106(1): 68-76.

[5] Sangoi L, Gracietti M A, Rampazzo C, Bianchetti P. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density [J]. Field Crop. Res., 2002, 79(1): 39-51.

[6] 杨国敏，孙淑娟，周勋波，等. 群体分布和灌溉对冬小麦农田光能利用的影响[J]. 应用生态学报，2009，20(8)：1868-1875.
Yang G M, Sun S J, Zhou X B *et al*. Effects of population distribution pattern and irrigation schedule on radiation utilization in winter wheat farm land [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2009, 20(8): 1868-1875.

[7] Simonetta F, Rosella M, Francesco G. The effect of nitrogenous fertiliser application on leaf traits in durum wheat in relation to grain yield and development [J]. Field Crop. Res., 2009, 110(1): 69-75.

[8] Xue L H, Cao W X, Yang L Z. Predicting grain yield and protein content in winter wheat at different N supply levels using canopy reflectance spectra [J]. Pedosphere, 2007, 17(5): 646-653.

[9] 范仲学，王志敏，梁振兴，等. 优化灌溉与施肥对冬小麦冠层结构的影响研究[J]. 中国生态农业学报，2005，13(3)：79-81.
Fan Z X, Wang Z M, Liang Z X *et al*. Effects of optimized irrigation and nitrogen fertilization on the canopy structure of winter wheat [J]. Chin. J. Eco-Agric., 2005, 13(3): 79-81.

[10] Fang Y, Xu B C, Turner N C, Li F M. Grain yield, dry matter accumulation and remobilization, and root respiration in winter wheat and affected by seeding rate and root pruning[J]. Eur. J. Agron., 2010, 33: 257-268.

[11] 王之杰，郭天财，王化岑，王永华. 种植密度对超高产小麦生育后期光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报，2001，21(3)：64-67.
Wang Z J, Guo T C, Wang H C, Wang Y H. Effect of planting density on photosynthetic characteristics and grain yield of super-high-yield winter wheat at late growth stages [J]. J. Triticeae Crops, 2001, 21(3): 64-67.

[12] Hiltbrunner J, Streit B, Liedgens M. Are seeding densities an

opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? [J]. Field Crop. Res., 2007, 102: 163-171.

[13] 杨文平, 郭天财, 刘胜波, 等. 行距配置对'兰考矮早八'小麦后期群体冠层结构及其微环境的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 485-490.
Yang W P, Guo T C, Liu S B *et al*. Effects of row spacing in winter wheat on canopy structure and microclimate in later growth stage [J]. J. Plant Ecol., 2008, 32(2): 485-490.

[14] 王焱, 毕建杰, 刘建栋, 叶宝兴. 水分胁迫对冬小麦冠层内的光分布影响的研究[J]. 华北农学报, 2009, 24(S1), 119-125.
Wang Y, Bi J J, Liu J D, Ye B X. Researches on effects of light distribution to winter wheat canopy under water stress [J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 2009, 24(S1): 119-125.

[15] 王法宏, 杨洪宾, 徐成忠, 等. 垄作栽培对小麦植株形态和产量性状的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(6): 1038-1040.
Wang F H, Yang H B, Xu C Z *et al*. Effect of raised bed planting on plant morphological characters and grain yield of winter wheat [J]. Acta Agron. Sin., 2007, 33(6): 1038-1040.

[16] 武永胜, 薛晖, 刘洋, 龚月桦. 持绿型小麦叶片衰老和叶绿素荧光特征的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 117-122.
Wu Y S, Xue H, Liu Y, Gong Y H. Study on senescence and chlorophyll fluorescence traits of stay-green leaf in wheat [J]. Agric. Res. Arid Areas, 2010, 28 (4): 117-122.

[17] Llorenç C B, Rossella A, José L A, Salvador N. Photosynthetic capacity of field-grown durum wheat under different N availabilities: A comparative study from leaf to canopy [J]. Environ. Exp. Bot., 2009, 67: 145-152.

[18] 阎素红, 杨兆生, 柴升. 小麦上三叶性状与产量及其构成因素的关系[J]. 麦类作物学报, 2004, 24(4): 39-42.
Yan S H, Yang Z S, Chai S. Relation between characters of the top-three leaves and yield and its compositions of wheat [J]. J. Triticeae Crops, 2004, 24(4): 39-42.

[19] 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 S T. Studies on the relationship between canopy apparent photosynthesis and grain yield in high-yielding winter wheat [J]. Acta Agron. Sin., 1991, 17(6): 461-469.

[20] Duncan W G. Maize [M]. Cambridge, U K: Cambridge University Press, 1975. 23-50.

[21] 肖凯, 张荣铣, 钱维朴. 氮素营养对小麦群体光合碳同化作用的影响及其调控机制[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 235-243.
Xiao K, Zhang R X, Qian W B. Effect and regulating mechanism of nitrogen nutrition on canopy photosynthetic carbon assimilation in wheat [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1999, 5(3): 235-243.

[22] 王之杰, 朱云集, 郭天财, 等. 超高产小麦冠层光辐射特征的研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(10): 1657-1662.
Wang Z J, Zhu Y J, Guo T C *et al*. Study on character of light radiation in canopy of super-high-yielding winter wheat [J]. Acta Bot. Bor-Occid. Sin., 2003, 23(10): 1657-1662.

[23] 张斯梅, 杨四军, 顾克军, 等. 不同穗型小麦品种叶面积、干物质积运及产量构成分析[J]. 江苏农业科学, 2010, (6): 114-116.
Zhang S M, Yang S J, Gu K J *et al*. Analyses of leaf area index, accumulation and redistribution of dry matter and the components of yield of different type ears winter wheat [J]. J. Jiangsu Agric. Sci., 2010, (6): 114-116.

[24] 郭天财, 王之杰, 胡廷积, 等. 不同穗型小麦品种群体光合特性及产量性状的研究[J]. 作物学报, 2001, 27(5): 632-639.
Guo T C, Wang Z J, Hu T J *et al*. Study on canopy apparent photosynthesis characteristics and grain yield traits of two winter wheat cultivaters with different spike type [J]. Acta Agron. Sin., 2001, 27(5): 632-639.

[25] 陈雨海, 余松烈, 于振文. 小麦生长后期群体光截获量及其分布与产量的关系[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 730-734.
Chen Y H, Yu S L, Yu Z W. Relationship between amount or distribution of PAR interception and grain output of wheat communities [J]. Acta Agron. Sin., 2003, 29(5): 730-734.

[26] Jessica B, Pierre M, Bruno A. Dynamics of light and nitrogen distribution during grain filling within wheat canopy [J]. Plant Physiol., 2008, 148: 1707-1720.

[27] 陈际型. 钾素营养对水稻根系生长和养分吸收的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34(2): 182-188.
Chen J X. Effect of K nutrition on rice root growth and nutrient uptake [J]. Acta Pedol. Sin., 1997, 34(2): 182-188.

[28] 王宝山, 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 215-220.
Wang B S. Plant physiology [M]. Beijing: Science Press, 2004. 215-220.

[29] Alejandro D P, Pilar P, Diego G *et al*. Gas exchange acclimation to elevated CO_2 in upper-sunlit and lower-shaded canopy leaves in relation to nitrogen acquisition and partitioning in wheat grown in field chambers [J]. Environ. Exp. Bot., 2007, 59: 371-380.

[30] 彭勃, 王阳, 李永祥, 等. 玉米子粒产量及产量构成因子的关系及条件QTL分析[J]. 作物学报, 2010, 36(10): 1624-1633.
Peng B, Wang Y, Li Y X *et al*. Correlation analysis and conditional QTL analysis of grain yield and yield components in maize [J]. Acta Agron. Sin., 2010, 36(10): 1624-1633.

[31] 曹承富, 孔令聪, 汪建来, 等. 施氮量对强筋和中筋小麦产量和品质及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 46-50.
Cao C F, Kong L C, Wang J L *et al*. Effects of nitrogen on yield, quality and nutritive absorption of middle and strong gluten wheat [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(1): 46-50.

[32] Kato T. Selection responses for the characters related yield sink capacity of rice [J]. Crop Sci., 1997, 37: 1472-1475.

[33] 熊又升, 袁家富, 郝福新, 等. 氮肥用量对不同小麦品种产量和品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2009, 28(6): 697-700.
Xiong Y S, Yuan J F, Hao F X *et al*. Effect of nitrogen dosage on the yield and quality of wheat [J]. J. Huazhong Agric. Univ., 2009, 28(6): 697-700.