

网络出版时间:2026-04-10

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20260408.1444.006

种植密度对不同品种春小麦产量形成的影响

倪行健¹,徐静茹¹,周婵婵¹,吴周周¹,刘佳欣¹,黄元财¹,王 术¹,丰 明²,王英杰²

(1. 沈阳农业大学农学院, 辽宁沈阳 110866; 2. 辽宁农业科学院作物科学研究所, 辽宁沈阳 110161)

摘要:为明确种植密度对不同春小麦品种产量形成的影响,以辽春 18、辽春 43 和沈麦 155 为材料,设置 5 个种植密度处理,分别为 375 万、525 万、675 万、825 万和 975 万株·hm⁻²(记为 D1、D2、D3、D4 和 D5),比较分析了不同种植密度对春小麦产量及其构成因素、SPAD 值、干物质积累与分配、叶面积指数(LAI)、粒叶比及光合特性的影响。结果表明,种植密度对春小麦产量及其构成因素具有显著调控作用,且品种与密度间存在显著互作效应。随着种植密度增加,3 个春小麦品种单位面积有效穗数呈显著增加趋势;而穗粒数和千粒重总体呈下降趋势;产量总体呈先增后降趋势,辽春 18 和沈麦 155 均在 D4 下产量最高,分别为 8 206.62 和 5 057.74 kg·hm⁻²,辽春 43 在 D2 下产量最高,为 7 191.61 kg·hm⁻²;花前干物质转运量、花前干物质转运效率、花前干物质对籽粒产量贡献率、花后干物质积累量、花后干物质对籽粒产量贡献率和旗叶 SPAD 值总体均呈先升高后降低趋势,且均在 D3 或 D4 下达最大;LAI、粒数叶比、粒重叶比、旗叶胞间 CO₂ 浓度、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均呈先升高后降低趋势。综合来看,辽春 18 和沈麦 155 的适宜种植密度为 825 万株·hm⁻²,辽春 43 的适宜种植密度为 525 万株·hm⁻²。

关键词:春小麦;种植密度;产量;生理特性

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)05-0658-09

Effect of Planting Density on Yield Formation of Different Spring Wheat Varieties

NI Xingjian¹, XU Jingru¹, ZHOU Chanchan¹, WU Zhouzhou¹, LIU Jiabin¹, HUANG Yuancai¹,
WANG Shu¹, FENG Ming², WANG Yingjie²

(1. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China; 2. Crop Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang, Liaoning 110161, China)

Abstract: To clarify the effects of planting density on yield formation in different spring wheat cultivars, a field experiment was conducted using three spring wheat cultivars, Liaochun 18, Liaochun 43, and Shenmai 155, under five planting densities of 3.75 million, 5.25 million, 6.75 million, 8.25 million, and 9.75 million plants·hm⁻², designated as D1, D2, D3, D4, and D5, respectively. The effects of planting density on grain yield and its components, SPAD value, dry matter accumulation and distribution, leaf area index(LAI), grain to leaf ratio, and photosynthetic characteristics were compared among cultivars. The results showed that planting density significantly affected grain yield and its components, with significant variety and planting density interaction effects. With the increase of planting density, the number of effective spikes per unit area of the three varieties spring wheat showed a significant increasing trend, while the number of grains per spike and 1 000-grain weight generally showed a decreasing trend, and the yield showed an initial increase and then a decrease. The yield of Liaochun 18 and Shenmai 155 reached the highest under the D4 treatment, which were 8 206.62 and 5 057.74 kg·hm⁻², respectively, the yield of Liaochun 43 reached the highest under the D2

收稿日期:2025-10-22

修回日期:2025-11-28

基金项目:沈阳市科技计划项目种业创新专项(24-215-2-16);辽宁省教育厅重点攻关项目(JYTZD2023125)

第一作者 E-mail:2023220264@stu.syau.edu.cn(倪行健)

通讯作者 E-mail:zhouchan@syau.edu.cn(周婵婵);swang123@syau.edu.cn(王 术)

treatment($7\ 191.61\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). With the increase of planting density, the dry matter transport before flowering, the dry matter transport efficiency before flowering, the contribution rate of dry matter before flowering to grain yield, the dry matter accumulation after flowering, the contribution rate of dry matter after flowering to grain yield, and the SPAD value of flag leaves all showed a trend of increasing first and then decreasing, and all reached the maximum at D3 or D4 treatments. The LAI, grain number per leaf, grain weight per leaf, intercellular CO_2 concentration of flag leaves, net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate all showed an initial increase and then decrease trend with the increase of planting density. In conclusion, the optimum planting density was $8.25\ \text{million plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ for Liaochun 18 and Shenmai 155, and $5.25\ \text{million plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ for Liaochun 43.

Keywords: Spring wheat; Planting density; Yield; Physiological characteristics

春小麦是中国“三北”地区的主要粮食作物,其高产和稳产对保障国家粮食安全与区域农业发展具有重要的战略意义^[1]。辽宁春小麦通常于3月中旬播种,6月末至7月初收获。由于其生育期较短,在粮食、蔬菜、油料等作物的间作、套种及复种体系中是一种理想的搭配作物。近年来,在全球气候变化加剧、耕地资源约束和生产成本持续上涨的多重挑战下,春小麦作为主要的夏粮作物在保障夏粮生产中具有重要作用^[2]。因此,如何通过调整春小麦种植密度进而优化群体结构实现产量突破,已成为春小麦研究的重要方向^[3]。

种植密度是构建小麦群体结构的重要基础,对群体光能截获、养分分配及田间微环境具有直接和间接的调控作用,是影响个体生长发育与群体质量的核心因素,并最终影响产量形成^[4]。小麦群体结构如叶面积指数、冠层透光率、植株空间排列等均受种植密度显著影响。适宜的种植密度有助于建立合理的群体结构,协调个体与群体之间在资源利用方面的矛盾,实现光、温、水、肥等资源的高效转化^[5]。已有研究表明,种植密度对小麦群体产量形成具有明显的阈值效应^[6]。单位面积穗数、穗粒数和千粒重是决定小麦产量的主要构成因素。适度提高种植密度可增加单位面积穗数,从而提高产量^[7];但过高的密度会激化植株间对光、热、水、肥的竞争,致使个体发育受阻、分蘖成穗率下降,减少穗粒数和千粒重,同时增加倒伏与病害风险,最终导致减产^[8-9]。不同基因型春小麦在株高、叶型、分蘖能力、抗倒伏等方面存在显著差异,从而导致其最适种植密度存在差异^[10-12]。一般而言,株型紧凑、茎秆坚韧、抗倒伏的现代品种具备较高的群体容纳能力。杨卫君等^[1]的研究

指出,不同基因型春小麦对密度胁迫的响应存在显著差异,耐密品种在高密度条件下仍能维持较高的光合效能和干物质分配能力,表现出较强的适应性及稳定性。因此,深入解析种植密度对春小麦产量相关生理因素的调控机制,对于构建春小麦区域化、标准化高产栽培技术体系具有重要的理论和实践意义。

本研究选用春小麦品种辽春 18、辽春 43 和沈麦 155 为材料,设置 5 个种植密度梯度,系统分析了不同密度下各品种的产量性状和相关生理特性的变化规律,旨在明确不同品种的适宜种植密度,为辽宁春小麦高产提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2024 年在辽宁省农业科学院小麦试验基地进行($41^{\circ}48' \text{N}$, $123^{\circ}25' \text{E}$),该试验站海拔 41 m,属典型的北温带大陆性季风气候区,年均气温 $8.4\ ^{\circ}\text{C}$,无霜期约 160 d,年日照时数 2 386 h, $\geq 10\ ^{\circ}\text{C}$ 年有效积温 $3\ 455\ ^{\circ}\text{C}$,年太阳辐射总量 $4\ 965\ \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,年均降水量 715.5 mm。试验地土壤类型为壤土,前茬作物为大豆。耕层土壤基础理化性质:有效磷含量 $34.54\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $171.92\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水解氮含量 $39.44\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效锌含量 $1.22\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,交换性钙含量 $10.24\ \text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,氯离子含量 $0.10\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 $16.71\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值 6.7。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,以小麦品种为主区、种植密度为副区。选用春小麦品种辽春 18、辽春 43 和沈麦 155 为供试材料(辽春 18、辽春 43 属于强

筋品种;沈麦 155 属于中筋品种);设置 5 个种植密度:375 万株 $\cdot$ hm $^{-2}$ (D1)、525 万株 $\cdot$ hm $^{-2}$ (D2)、675 万株 $\cdot$ hm $^{-2}$ (D3)、825 万株 $\cdot$ hm $^{-2}$ (D4)以及 975 万株 $\cdot$ hm $^{-2}$ (D5)。共 15 个处理,每处理 3 次重复。采用条播方式播种,行距 20 cm,小区面积 10.2 m 2 (3.4 m $\times$ 3.0 m)。2024 年 3 月 24 日左右播种,4 月 5 日左右出苗,6 月 30 日左右收获。各处理施肥水平一致,播前基施农家肥 45 000 kg $\cdot$ hm $^{-2}$ 、纯氮 150 kg $\cdot$ hm $^{-2}$ 、P $_2$ O $_5$ 150 kg $\cdot$ hm $^{-2}$ 和 K $_2$ O 150 kg $\cdot$ hm $^{-2}$,于整地旋耕前一次性施入。采用喷灌的灌溉方式,一条喷灌带服务 10 行小麦,喷灌带左右两侧各 5 行。其他管理措施与当地春小麦生产田一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及产量构成因素的测定

于成熟期在每个小区随机挑选长势均匀长 20 cm 的 2 行区段作为样本用于室内考种,剔除穗粒数小于 5 粒的穗后,统计有效穗数,并计算单位面积穗数、穗粒数以及千粒重。收获时去除边行,按实际收获面积计算产量,并测定籽粒含水量,统一折算为含水量 14% 的标准产量。

1.3.2 SPAD 值的测定

于开花后 0、7、14 和 21 d,用 SPAD-502 便携式叶绿素测定仪测定春小麦旗叶 1/3 处 SPAD 值,每个小区测定 5 片叶,取其平均值作为该小区观测值。

1.3.3 干物质积累及转运的测定

分别于孕穗期和成熟期取样,每小区选取有代表性植株 20 株,分为叶、茎和穗,于 105 $^{\circ}$ C 杀青 1 h 后,再于 80 $^{\circ}$ C 烘干至恒重,称取各器官干物质质量。计算花前干物质转运量、花前干物质转运效率、花前干物质对籽粒产量贡献率、花后干物质积累量以及花后干物质对籽粒产量贡献率^[13]。

花前干物质转运量=开花期干物质积累量-成熟期干物质积累量;

花前干物质转运效率=花前干物质转运量/开花期干物质积累量 $\times$ 100%;

花前干物质对籽粒产量贡献率=花前营养器官贮藏干物质转运量/成熟期籽粒干重 $\times$ 100%;

花后干物质积累量=成熟期籽粒干重-花前干物质转运量;

花后干物质对籽粒产量贡献率=花后干物质积累量/成熟期籽粒干重 $\times$ 100%。

1.3.4 叶面积指数(LAI)的测定

在各密度处理中随机选取区域面积为 A(30 cm $\times$ 20 cm)的样方,记录样方内小麦总株数(记为 N)。在样方内随机选取 10 株小麦,测定每株所有叶片的长度和宽度,并采用长宽系数法计算叶面积。单片叶面积=叶长 $\times$ 叶宽 $\times$ 0.83。单株叶面积为该植株所有叶片面积之和。将 10 株小麦单株叶面积平均值记为 m,则叶面积指数(LAI)=(N $\times$ m)/A。

1.3.5 粒叶比的测定

于小麦孕穗期测定单株叶面积(此时叶面积达到最大),成熟期调查单株粒数和粒重,计算粒数叶比(粒数/总叶面积)和粒重叶比(粒重/总叶面积)。

1.3.6 光合特性指标的测定

开花期选择同日开花、长势一致的麦穗进行挂牌标记,每个处理选取 5 株,于花后 14 d 晴朗无云的天气 9:00—11:00 采用 Li-6800 型便携式光合仪测定旗叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO $_2$ 浓度(C_i),各参数设置光照强度 1 000 μ mol $\cdot$ m $^{-2}\cdot$ s $^{-1}$,叶室温度 25 $^{\circ}$ C,湿度 60%,CO $_2$ 浓度 400 μ mol $\cdot$ mol $^{-1}$ 。

1.4 数据处理

使用 Excel 2021 与 SPSS 26 软件进行数据统计分析,采用双因素方差分析(ANOVA)并用 Duncan's 进行显著性检验($\alpha=0.05$),使用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 种植密度对不同春小麦品种产量及其构成因素的影响

春小麦品种、种植密度和品种与种植密度互作对有效穗数、千粒重、穗粒数和产量均有显著或极显著影响(表 1)。在同一品种下,随着种植密度增加,有效穗数均呈增加趋势,穗粒数则呈下降趋势,产量呈先升后降趋势。辽春 18 在 D4 下产量显著高于 D1、D2 和 D5;辽春 43 在 D2 下产量达到最高值,但仅与 D5 差异显著;沈麦 155 在 D4 下产量达到最高值,但与其他密度差异不显著。在相同密度条件下,有效穗数和千粒重大小整体表现为辽春 18>辽春 43>沈麦 155;穗粒数在 D1、D2 和 D3 下整体表现为辽春 43>沈麦 155>辽春 18,在 D4 和 D5 下表现为辽春 18>沈麦 155>辽春 43;产量在 D1 和 D2 下表现为辽春 43>辽

春 18>沈麦 155,在 D3、D4 和 D5 下表现为辽春 18>辽春 43>沈麦 155。综合来看,辽春 18 较高产量主要与较高的有效穗数和千粒重有关。适当提高种植密度可增加单位面积穗数,但过高密度会降低穗粒数和千粒重,从而影响产量形成。

2.2 种植密度对不同春小麦品种干物质积累及转运的影响

春小麦品种、种植密度及其互作对花前干物质转运量、花前干物质转运效率、花前干物质对籽粒产量贡献率、花后干物质积累量及花后干物质对籽粒产量贡献率均产生极显著影响(表 2)。随种植密度增加,3 个品种的花前干物质转运量、花前干物质转运效率、花前干物质对籽粒产量贡献率、花后干物质积累量以及花后干物质对籽粒产量贡献率整体上均呈先升高后降低的趋势,均在 D3 或 D4 处理下最大。同一种植密度下,花前干物质转运量在 D1~D3 下大小整体表现为沈麦 155>辽春 43>辽春 18,而在 D4 和 D5 下则表现

为辽春 43>辽春 18>沈麦 155。花前干物质转运效率在 D1 和 D2 下大小表现为辽春 43>辽春 18>沈麦 155,在 D3~D5 下则表现为沈麦 155>辽春 43>辽春 18。花前干物质对籽粒产量贡献率在 D1~D3 下表现为沈麦 155>辽春 18>辽春 43,而在 D4 和 D5 下则表现为辽春 43>沈麦 155>辽春 18。花后干物质积累量在 D1 和 D2 下大小整体表现为辽春 43>辽春 18>沈麦 155,而在 D3~D5 下则表现为辽春 18>辽春 43>沈麦 155。花后干物质对籽粒产量贡献率在 D1 和 D5 下表现为辽春 43>辽春 18>沈麦 155,在 D2~D4 下则表现为辽春 18>辽春 43>沈麦 155。综合来看,不同春小麦品种对种植密度的响应存在明显差异,沈麦 155 在低/中等密度(D1~D3)下花前干物质转运优势较为明显;辽春 18 在中高密度条件(D3~D5)下花后干物质积累能力较强;辽春 43 对不同种植密度的适应范围相对较宽,在较大密度区间内能够保持较为协调的花前转运和花后积累特征。

表 1 不同处理下春小麦产量及其构成因素

Table 1 Yield and their components of spring wheat under different treatments

品种 Variety	种植密度 Planting density	有效穗数 Effective spikes/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Grain yield/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
辽春 18 Liaochun 18	D1	411.13f	39.57d	45.18a	6 935.32bc
	D2	483.36e	36.43ef	45.48a	6 781.99bc
	D3	550.03d	36.10f	43.56bc	8 167.45a
	D4	622.25b	39.10de	44.64ab	8 206.62a
	D5	744.48a	31.60gh	43.26cd	6 654.52bc
辽春 43 Liaochun 43	D1	333.35g	52.37a	42.43d	7 079.22b
	D2	522.25de	42.87c	42.93cd	7 191.61b
	D3	533.36d	47.00b	36.61h	6 566.47bc
	D4	594.47c	30.10hi	44.62ab	6 947.09bc
	D5	655.59b	25.27j	37.32h	5 830.26d
沈麦 155 Shenmai 155	D1	338.91g	40.53cd	39.39fg	4 624.77e
	D2	405.58f	38.40def	40.53e	4 980.03de
	D3	516.69de	29.03hi	39.77g	4 633.39e
	D4	494.47de	33.37g	40.08ef	5 057.74de
	D5	600.03c	28.10i	36.58h	4 702.42e
品种 V		* *	*	* *	* *
种植密度 D		* *	* *	*	*
品种 $\times$ 种植密度 V $\times$ D		*	*	*	*

表中同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。* 和 * * 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下同。
Different letters within the same column indicate significant differences among treatments at 0.05 level. * and * * indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same in tables 2–4.

表 2 不同处理下春小麦干物质积累与转运
Table 2 Dry matter accumulation and transportation of spring wheat under different treatments

品种 Variety	种植密度 Planting density	花前干物质转运量 Pre-anthesis dry matter translocation/ (kg · hm ⁻²)	花前干物质 转运效率 Pre-anthesis dry matter translocation efficiency/%	花前干物质对 籽粒产量贡献率 Contribution of pre-anthesis dry matter translocation to grain yield/%	花后干物质 积累量 Post-anthesis dry matter accumulation/ (kg · hm ⁻²)	花后干物质 对籽粒产量贡献率 Contribution of post-anthesis dry matter accumulation to grain yield/%
辽春 18 Liaochun18	D1	1 434.08f	26.72d	27.26d	5 117.91e	61.33de
	D2	1 709.91e	29.17cd	29.38c	7 057.04c	68.97ab
	D3	2 145.78cd	31.52c	37.44b	9 397.2b	71.28a
	D4	2 860.83ab	31.86c	27.64d	10 720.45a	62.00d
	D5	2 650.09b	25.64d	28.38cd	9 242.39b	54.82g
辽春 43 Liaochun 43	D1	1 473.97f	31.33c	26.04e	6 834.41cd	62.74cd
	D2	1 892.83de	30.03c	29.08c	7 574.05c	64.91c
	D3	2 331.54c	32.44c	29.10c	9 057.29b	67.18b
	D4	3 111.72a	35.68b	42.14a	8 001.29c	60.00e
	D5	2 675.77b	30.15c	38.66b	7 197.46c	57.34f
沈麦 155 Shenmai 155	D1	1 768.99e	26.63d	32.28c	4 161.28f	49.31h
	D2	1 990.09d	28.44d	30.96c	5 169.94e	62.00d
	D3	2 848.48ab	37.79a	44.12a	6 305.78d	66.68b
	D4	2 094.76d	39.30a	29.76c	6 814.38cd	58.00f
	D5	2 519.82bc	27.81d	38.02b	6 415.53d	47.14h
品种 V		* *	* *	* *	* *	* *
种植密度 D		* *	* *	* *	* *	* *
品种×种植密度 V×D		* *	* *	* *	* *	* *

2.3 种植密度对不同春小麦品种叶面积指数的影响

春小麦品种、种植密度及其互作对拔节期、孕穗期和开花期叶面积指数的影响均达到极显著水平(表 3)。随生育进程推进,3 个品种叶面积指数总体呈先升高后降低的趋势,并在孕穗期达到最大值。随种植密度增加,各品种在不同生育时期的叶面积指数总体呈先增后减的趋势,均在 D4 下最大。这说明适当提高种植密度有利于提高春小麦群体叶面积指数,但过高密度不利于其进一步增加。

2.4 种植密度对不同春小麦品种粒叶比的影响

随着种植密度增加,3 个品种春小麦的粒数叶比和粒重叶比总体均呈先升高后降低的变化趋势(图 1)。品种间比较表明,粒数叶比在低/中等密度(D1~D3)下总体表现为辽春 43>辽春 18>沈麦 155,而在较高密度(D4、D5)下则表现为辽春 18>辽春 43>沈麦 155。粒重叶比在 D1 下表现为辽春 43>辽春 18>沈麦 155,而在其余密度下整体表现为辽春 18>辽春 43>沈麦 155,说明

辽春 18 在多数密度下单位叶面积对应的粒重相对较高,沈麦 155 则整体较低。随种植密度的增加,3 个春小麦品种的粒重叶比整体均呈先升后降趋势,辽春 18 的粒数叶比和粒重叶比的峰值分别出现在 D4 和 D3 下;辽春 43 均在 D3 下最高;沈麦 155 粒数叶比和粒重叶比整体水平分别在 D3 和 D4 下较低,且对密度变化较为敏感。

2.5 种植密度对不同春小麦品种旗叶 SPAD 的影响

小麦旗叶 SPAD 值随发育进程推进总体呈先升高后降低的变化趋势,并在花后 7 d 达到较高水平(图 2)。同一种种植密度下,各品种旗叶 SPAD 在 D3 下表现为辽春 43>辽春 18>沈麦 155,其余密度下均表现为沈麦 155>辽春 43>辽春 18。同一小麦品种下,辽春 18 与沈麦 155 在不同种植密度下的旗叶 SPAD 值均表现为 D3>D2>D1>D5>D4,而辽春 43 表现为 D2>D3>D4>D5>D1。这说明适当增加种植密度有利于提高春小麦旗叶 SPAD 值,但不同品种对密度调控的响应存在差异。

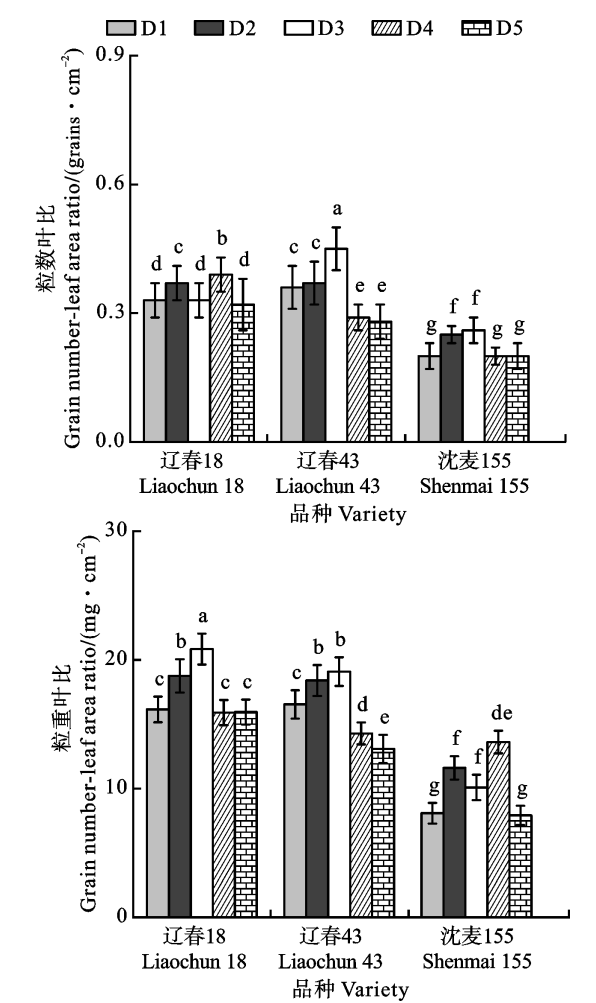
表 3 不同处理下春小麦不同生育时期的叶面积指数

Table 3 Leaf area index of spring wheat at different growth stages under different treatments

品种 Variety	种植密度 Planting density	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Anthesis
辽春 18 Liaochun18	D1	1.76f	2.09i	1.87k
	D2	2.13e	2.36h	2.23i
	D3	2.68c	3.01e	2.81g
	D4	3.31b	3.71bc	3.58c
	D5	3.29b	3.63c	3.45d
辽春 43 Liaochun 43	D1	2.24de	2.44gh	2.33i
	D2	2.61c	2.99e	2.78g
	D3	2.40d	2.78f	2.55h
	D4	2.79c	3.26d	3.01e
	D5	2.63c	3.11de	2.94ef
沈麦 155 Shenmai 155	D1	1.84f	2.62fg	2.12j
	D2	2.72c	3.13de	2.88fg
	D3	3.68a	3.88b	3.71b
	D4	3.77a	4.08a	3.87a
	D5	3.28b	3.67c	3.44d
品种 V		* *	* *	* *
种植密度 D		* *	* *	* *
品种×种植密度 V×D		* *	* *	* *

2.6 种植密度对不同春小麦品种光合特性的影响

种植密度、品种与种植密度交互均对春小麦花后 14 d 旗叶 C_i 、 P_n 、 G_s 和 T_r 的影响均达显著或极显著水平;品种对 C_i 、 P_n 、 G_s 的影响达极显著水平,对 T_r 的影响不显著(表 4)。3 个品种花后 14 d 旗叶的 C_i 、 P_n 、 G_s 和 T_r 均随密度增加呈先升后降趋势,其中辽春 18 和辽春 43 均在 D4 下最高,沈麦 155 在 D2 下最高。总体来看,适宜的种植密度有利于提高春小麦旗叶光合效率。



图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different letters indicate significant differences among density treatments at 0.05 level. The same in figure 2.

图 1 不同处理下春小麦粒数叶比和粒重叶比

Fig. 1 Different treatments on grain number-to-leaf area ratio and grain weight-to-leaf area ratio in different spring wheat varieties

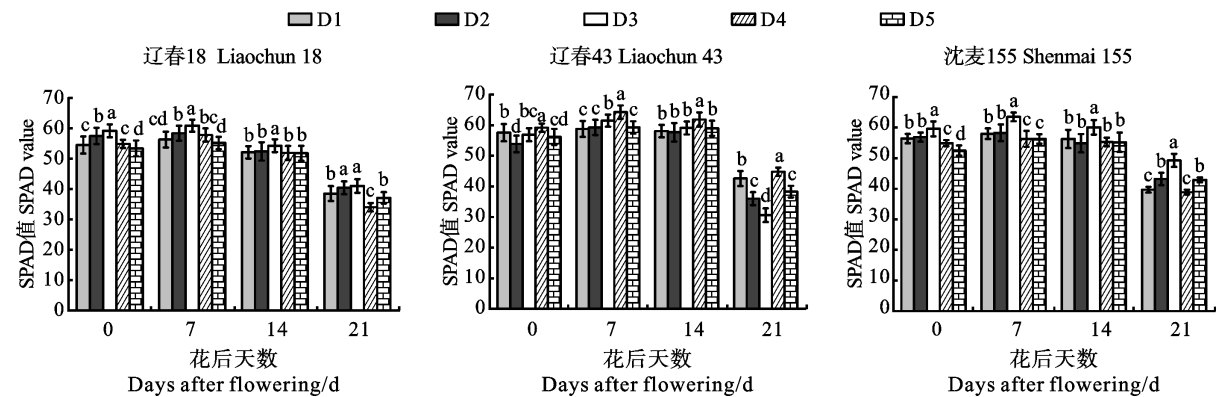


图 2 不同处理下春小麦旗叶 SPAD 的变化

Fig. 2 Changes of SPAD value in flag leaves of spring wheat under different treatments

表 4 开花后 14 d 不同处理下春小麦光合特征的变化

Table 4 Changes in photosynthetic characteristics of spring wheat under different treatments 14 days after flowering					
品种 Variety	种植密度 Planting density	$C_i/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	$P_n/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$G_s/$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$T_r/$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
辽春 18 Liaochun18	D1	311.00ab	21.50h	534.50f	8.03bc
	D2	310.00ab	23.15def	626.50bc	8.93ab
	D3	285.50f	22.25g	448.00h	7.33c
	D4	316.00a	24.15bc	630.50bc	9.03a
	D5	287.50ef	23.45de	501.50g	7.97bc
辽春 43 Liaochun 43	D1	304.50bc	20.70i	515.50g	7.99bc
	D2	299.50cd	23.60cd	602.50d	8.34ab
	D3	295.50cd	24.65b	610.50cd	8.40ab
	D4	316.50a	24.75b	683.00a	8.89ab
	D5	299.00cd	20.20i	574.00e	8.77ab
沈麦 155 Shenmai 155	D1	296.50cd	24.30bc	624.50bc	8.43ab
	D2	308.00ab	28.00a	688.50a	8.75ab
	D3	294.00de	24.20bc	634.00bc	8.64ab
	D4	286.00f	23.60cd	666.00ab	8.32ab
	D5	293.50de	22.55fg	531.50f	8.07bc
品种 V		* *	* *	* *	NS
种植密度 D		* *	* *	* *	*
品种×种植密度 V×D		* *	* *	*	*

3 讨论

3.1 种植密度通过调控群体结构与光合特性对产量的影响

本研究中,3 个春小麦品种的产量随种植密度增加均表现为先升后降的变化趋势。辽春 18 和沈麦 155 在 D4 下产量较高,而辽春 43 产量在 D2 下达到最高,不同品种对种植密度的响应存在差异,这可能与品种株型特征、群体构建方式及同化物分配模式不同有关^[14]。已有研究指出,适宜的种植密度是发挥小麦产量潜力的重要条件,而不同基因型间普遍存在最适密度差异,当种植密度过高时,群体竞争加剧、通风透光性变差、倒伏和病害风险增加,产量反而下降^[13]。

在产量构成方面,随种植密度提高,单位面积有效穗数显著增加,而穗粒数和千粒重总体下降。本研究结果与刘芳亮等^[15]报道提高种植密度有利于提高单位面积穗数,但会抑制粒数和千粒重的结论基本一致。这是由于密度增加的过程中,群体水平上通过增加单位面积穗数获得更多潜在结实位点,但单株生长空间和资源供给受限,分蘖成穗率、穗部粒数及籽粒充实过程受到抑制^[16]。

因此,高产栽培的关键在于在适宜的密度条件下实现单位面积有效穗数、穗粒数与千粒重三者之间的协同优化与动态平衡。

光合作用是产量形成的生理基础, C_i 、 P_n 、 G_s 和 T_r 是评价光合性能的重要指标^[17]。本研究中,3 个春小麦品种旗叶的 C_i 、 P_n 、 G_s 和 T_r 随种植密度增加均表现为先升后降,辽春 18 在 D4 下主要光合参数较高,且该处理产量最高;辽春 43 虽在 D4 下光合参数总体较高,但其产量峰值出现在 D2 下;沈麦 155 则在 D2 下单叶光合能力较强,而在 D4 下群体产量较优。这说明适宜密度不仅影响单叶光合能力,还通过调节群体结构和群体光合生产能力共同决定最终产量。密度过大时,群体郁蔽,冠层中下部叶片受光明显不足,光合产物合成受限,旗叶光合潜力也随之下降^[18-19]。SPAD 值作为叶绿素含量的近似指标,反映叶片光合潜力。本研究中,适当增密(D3、D4)有利于维持或提高花后旗叶 SPAD 值,但过高的种植密度(D5)下部分处理 SPAD 值下降,可能与冠层光分布不均、下部叶片提前衰老有关^[20-21]。LAI 在孕穗期达到峰值,且随密度增加呈现先升后降的现象。适度增密可增强群体的光能截获能

力,而当 LAI 过大时,冠层下部光照水平迅速下降,致使群体光合“边际效应”减弱^[22]。本研究中,在各春小麦品种产量最优或接近最优的密度下,旗叶 P_n 、SPAD 值与 LAI 水平总体较高,说明合理密度下通过调控群体结构与冠层光环境,能够协同提升群体光合能力和产量水平。

3.2 干物质积累与源库协调对产量的影响

花前干物质转运量、转运效率及其对籽粒产量贡献率和花后干物质积累量及其贡献率等指标随种植密度的增加均表现出先升后降的总体趋势,并在不同品种、不同密度间存在明显差异。这说明不同品种在“依赖花前同化物转运”与“依赖花后光合同化”两种供源方式上的相对重要性存在差别^[23-26]。本研究结果显示,在一定密度范围内,提高密度有利于增强群体光合能力和花后干物质积累,从而提高花后干物质对籽粒产量的贡献;但过高密度下,植株间竞争加剧,营养生产受到抑制,花前、花后干物质对籽粒的供给均受到限制。

粒叶比通常指单位土地面积上籽粒产量与该面积上叶面积持续期的比值,是协调群体源库关系、实现高产的关键指标^[27]。本研究中,3个春小麦品种的粒数叶比和粒重叶比随密度增加总体呈先升后降趋势,其峰值密度与产量和群体干物质积累的最适密度区间基本一致,说明在适宜密度下,叶面积(源)与籽粒数量、籽粒充实(库)之间保持相对协调,有利于实现较高的产量水平^[27]。各品种间粒叶比水平存在差异,反映了其源库配置特征不同。辽春 18 的粒数叶比和粒重叶比的峰值分别出现在 D4 和 D3 下,辽春 43 均出现在 D3 下,表明其籽粒建成潜力较强;而沈麦 155 的粒叶比整体显著较低,反映其库容量有限,导致产量潜力未能充分发挥,这与訾妍等^[28]研究结论一致。

4 结论

本研究条件下,辽春 18 在 825 万株·hm⁻² 种植密度下产量最高,其产量形成以较高的单位面积穗数、较大的千粒重以及较高的花后干物质积累和粒重叶比为主要特征;辽春 43 在 525 万株·hm⁻² 种植密度下达到产量峰值,主要依靠较高的穗粒数和协调的花前、花后干物质供给来实现较高产量;沈麦 155 在 825 万株·hm⁻² 种植密度下产量较优,其特点是在适宜密度下群体干物质积累能力和旗叶光合性能较好。

参考文献:

- [1] 杨卫君,贾永红,石书兵,等. 播期和密度对春小麦品种新春 26 号生长及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2016,36(7):913. YANG W J, JIA Y H, SHI S B, et al. Effect of sowing date and planting density on growth and yield of spring wheat Xin-chun 26 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(7):913.
- [2] 闻磊,张富仓,邹海洋,等. 水分亏缺和施氮对春小麦生长和水氮利用的影响[J]. 麦类作物学报,2019,39(4):478. WEN L, ZHANG F C, ZOU H Y, et al. Effect of water deficit and nitrogen rate on the growth, water and nitrogen use of spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(4):478.
- [3] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915. ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):915.
- [4] 陈小龙,孙占波,李前荣,等. 种植密度对宁夏春小麦新品种(系)群体结构及产量的影响[J]. 作物杂志,2013(3):99. CHEN X L, SUN Z B, LI Q R, et al. Influence of planting density on group structure and yield of new spring wheat varieties (lines) in Ningxia [J]. *Crops*, 2013(3):99.
- [5] 孔令英,赵俊晔,于振文,等. 宽幅播种条件下种植密度对小麦群体结构和光能利用率的影响[J]. 麦类作物学报,2020,40(7):850. KONG L Y, ZHAO J Y, YU Z W, et al. Effect of planting density on population structure and light use efficiency of wheat under wide-width sowing conditions [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(7):850.
- [6] 李春喜,石惠恩,姜丽娜. 小麦不同种植密度粒重分布特性的研究[J]. 西北植物学报,1999,19(1):132. LI C X, SHI H E, JIANG L N. Investigation on the grain weight distribution characteristic of wheat in different densities [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1999, 19(1):132.
- [7] 杨毅轩,陈应枝,唐芃,等. 播种方式对黄淮海麦区西部冬小麦氮素利用与产量形成的影响[J]. 应用生态学报,2023,34(6):1572. YANG Y X, CHEN Y Z, TANG P, et al. Effects of sowing patterns on nitrogen utilization and yield formation of winter wheat in the western Huang-Huai-Hai region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(6):1572.
- [8] 廉博,李强,魏晓军,等. 耕作方式与种植密度对土壤物理性状及春小麦产量性状的影响[J]. 北方农业学报,2021,49(2):17. LIAN B, LI Q, WEI X J, et al. The effects of tillage pattern and planting density on soil physical properties and spring wheat yield traits [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2021, 49(2):17.
- [9] 王凯,贾永红,罗四维,等. 播种方式和种植密度对冬小麦根系生长和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2023,43(2):225. WANG K, JIA Y H, LUO S W, et al. Effect of sowing pattern and planting density on root growth and yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(2):225.
- [10] 吴晓丽,包维楷. 基因型及播种密度对冬小麦分蘖期生长、生物量分配及产量的影响[J]. 应用与环境生物学报,2011,17(3):369. WU X L, BAO W K. Effects of genotype and sowing density on growth, biomass allocation and yield of winter wheat at

- tillering stage [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2011, 17(3): 369.
- [11] 孟凡德, 马林, 石书兵, 等. 不同耕作条件下春小麦干物质积累动态及其相关性状的研究[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(4): 693.
- MENG F D, MA L, SHI S B, *et al.* Dynamics change of dry matter accumulation and relative characteristics of spring wheat under different tillage [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(4): 693.
- [12] 张向前, 陈欢, 赵竹, 等. 密度和行距对早播小麦生长、光合及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(1): 86.
- ZHANG X Q, CHEN H, ZHAO Z, *et al.* Effect of planting density and row spacing on growth, photosynthesis and yield of wheat under early sowing [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(1): 86.
- [13] 邵凯, 李建伟, 于立河, 等. 不同行距和密度对耐密品种克旱16花后个体质量和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(4): 465.
- SHAO K, LI J W, YU L H, *et al.* Effect of plant density and row spacing on growth and yield of post-anthesis individual in spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(4): 465.
- [14] 刘梦莹, 张玉, 张嘉豪, 等. 小麦直立株型种质耐密性评价及鉴定指标筛选[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(3): 349.
- LIU M Y, ZHANG Y, ZHANG J H, *et al.* Evaluation and screening of identification indices of planting density tolerance in common wheat germplasm with erect plant type [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(3): 349.
- [15] 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.
- 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.
- [16] 陈猛, 梁雪齐, 李玲, 等. 种植密度对匀播冬小麦干物质积累、转运及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(2): 238.
- CHEN M, LIANG X Q, LI L, *et al.* Effect of planting density on dry matter accumulation, translocation and grain yield of uniformly sown winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(2): 238.
- [17] 于娜, 陈广周, 贾永红, 等. 保水剂对新疆减灌春小麦光合性能、产量和水分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(8): 1070.
- YU S, CHEN G Z, JIA Y H, *et al.* Effects of water-retaining agents on photosynthetic performance, yield and water use efficiency of reduced-irrigation spring wheat in Xinjiang [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(8): 1070.
- [18] 孙鹏, 张金汕, 贾永红, 等. 立体匀播和种植密度对冬小麦农艺性状及光合特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(7): 844.
- SUN P, ZHANG JS, JIA Y H, *et al.* Effects of stereoscopic planting and planting density on agronomic traits and photosynthetic characteristics of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(7): 844.
- [19] 丰明, 王英杰, 王术, 等. 灌溉模式和播种密度对东北地区春小麦光合效率及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(6): 69.
- FENG M, WANG Y J, WANG S, *et al.* Effects of irrigation mode and sowing density on photosynthetic efficiency and yield of spring wheat in Northeast China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(6): 69.
- [20] 孔令英, 张振, 赵俊晔, 等. 种植密度对宽幅播种小麦开花后旗叶光合特性和干物质积累与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(12): 1573.
- KONG L Y, ZHANG Z, ZHAO J Y, *et al.* Effects of planting density on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation and transport in flag leaves of wheat after anthesis under wide-sowing conditions [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(12): 1573.
- [21] 郭丹丹, 刘哲文, 常旭虹, 等. 强筋小麦群体结构、光能利用及籽粒产量对种植密度与追氮模式的响应[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(1): 82.
- GUO D D, LIU Z W, CHANG X H, *et al.* Response of population structure, light utilization and grain yield to planting density and nitrogen topdressing in strong gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(1): 82.
- [22] ZHANG Y P, ZHANG Y H, WANG Z M, *et al.* Characteristics of canopy structure and contributions of non-leaf organs to yield in winter wheat under different irrigated conditions [J]. *Field Crops Research*, 2011, 123(3): 187.
- [23] 李长辉, 邵立刚, 王岩, 等. 不同生态类型春小麦叶面积及其干物质积累动态变化特点的研究[J]. 黑龙江农业科学, 2005(6): 11.
- LI C H, SHAO L G, WANG Y, *et al.* Study on the dynamic accumulation character of LA and DM and in spring wheat cultivar with different eco-type [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2005(6): 11.
- [24] 冯学颖, 刘景辉, 赵宝平, 等. 宽幅条播和种植密度对燕麦光合特性及干物质积累量的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(12): 1527.
- FENG X Y, LIU J H, ZHAO B P, *et al.* Effects of wide sowing and planting density on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of oat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(12): 1527.
- [25] FENG S W, SHI C C, WANG P Y, *et al.* Optimizing wheat planting density by adjusting population structure and stabilizing stem strength to achieve high and stable yields [J]. *Agronomy*, 2024, 14(8): 1853.
- [26] BASTOS L M, CARCIOCHI W, LOLLATO R P, *et al.* Winter wheat yield response to plant density as a function of yield environment and tillering potential: A review and field studies [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 54.
- [27] 刘克礼, 翟利剑, 高聚林, 等. 春小麦源库特性及其关系的研究(II): 群体库源比及其与产量的关系[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(4): 63.
- LIU K L, ZHAI L J, GAO J L, *et al.* Study on the characters of source and sink and their relation in spring wheat (II): Ratio of community source and sink and its relation with yield [J]. *Acta Triticeae Crops*, 2003, 23(4): 63.
- [28] 瞿妍, 丁锦峰, 车正, 等. 种植密度对扬糯麦1号籽粒产量与群体质量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(4): 521.
- ZI Y, DING J F, CHE Z, *et al.* Effects of planting density on grain yield and population characteristics of waxy wheat variety Yangnuomai 1 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(4): 521.