

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.05.005

倪永静, 张修引, 郭灿, 等. 种植密度和播种方式对小麦新品种尚农 9 生长及产量的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(5): 51-62.

种植密度和播种方式对小麦新品种 尚农 9 生长及产量的影响

倪永静^{1,2}, 张修引¹, 郭灿¹, 祝学强¹, 马梦金²,
申炎博², 孙凤岭¹, 李艳萍¹, 李磊³, 刘红杰¹

1. 商丘市农林科学院, 河南 商丘 476000; 2. 燧皇种业实验室, 河南 商丘 476000;

3. 河南农业大学 农学院, 河南 郑州 450046

摘要: 为优化小麦新品种尚农 9 配套栽培技术并加快示范推广, 于 2021/2022 和 2022/2023 两个小麦生长季设置裂区试验, 探索种植密度(2.0×10^6 、 2.75×10^6 、 3.5×10^6 、 4.25×10^6 、 5.0×10^6 株/hm²)与播种方式(传统条播和宽幅播种)的互作对冬小麦生长及产量的调控效应。结果表明: 种植密度和播种方式对冬小麦单株分蘖、群体、株高、物质转运和产量的影响均达到统计学意义($p < 0.01$)。相同种植密度下, 宽幅播种与传统条播相比, 单株分蘖能力更强, 群体数更高, 基部节间长度更短, 可有效降低重心高度和株高, 从而提升其抗倒性。随着种植密度增加, 营养器官干物质转运量、转运效率和贡献率均先增后降。小麦产量随种植密度先升后降, 其中传统条播方式 3.5×10^6 株/hm²、宽幅播种方式 4.25×10^6 株/hm² 时达到产量峰值, 宽幅播种在较高密度下产量优势显著, 增产在 13.72% 以上。种植密度、播种方式和年份均显著影响小麦的产量及构成要素。综上表明: 宽幅播种适配 4.25×10^6 株/hm² 可协调小麦生长、提高产量, 是尚农 9 稳产高产高效的最优组合。

关键词: 尚农 9; 宽幅播种; 种植密度; 产量

中图分类号: S512 **文献标识码:** A

文章编号: 1673-9868(2026)05-0051-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Seeding Density and Method on the Growth and Yield of Wheat Variety Shangnong 9

NI Yongjing^{1,2}, ZHANG Xiuyin¹, GUO Can¹,
ZHU Xueqiang¹, MA Mengjin², SHEN Yanbo²,
SUN Fengling¹, LI Yanping¹, LI Lei³, LIU Hongjie¹

收稿日期: 2025-12-16

基金项目: 河南省科技攻关项目(242102110223); 国家重点研发计划项目(2023YFD2301502)。

作者简介: 倪永静, 硕士, 副研究员, 主要从事小麦育种与栽培技术研究。

通信作者: 刘红杰, 硕士, 副研究员。

1. Shangqiu Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shangqiu Henan 476000, China;
2. Suihuang Seed Industry Laboratory, Shangqiu Henan 476000, China;
3. College of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou Henan 450046, China

Abstract: To optimize the supporting cultivation techniques and accelerate the demonstration and extension of the new wheat variety Shangnong 9, a split-plot experiment was conducted over two consecutive growing seasons (2021/2022 and 2022/2023). The experiment aimed to explore the interactive effects of seeding density (2.0×10^6 、 2.75×10^6 、 3.5×10^6 、 4.25×10^6 、 5.0×10^6 plants/hm²) and sowing method (traditional drilling vs. wide-width sowing) on the growth and yield regulation of winter wheat. The results indicated that the effects of planting density and sowing method on tillers per plant, population, plant height, dry matter translocation, and yield of winter wheat, were all statistically significant ($p < 0.01$). At the same seeding density, compared with traditional drilling, wide-width sowing resulted in stronger individual tillering ability, a larger population size, shorter basal internode length, effectively lowering the center of gravity and plant height, thereby enhancing lodging resistance. As seeding density increased, the dry matter translocation amount, translocation efficiency, and contribution rate of vegetative organs all initially increased and then decreased. Wheat yield first increased and then decreased with increasing planting density, peaking at 3.5×10^6 plants/hm² under traditional drilling and at 4.25×10^6 plants/hm² under wide-width sowing. Wide-width sowing demonstrated a significant yield advantage at higher densities, increasing yields by more than 13.72%. The effects of seeding density, sowing method and growing year significantly influenced wheat yield and its components. In conclusion, wide-width sowing combined with a density of 4.25×10^6 plants/hm² can coordinate wheat growth and increase yield, which is the optimal combination for stable, high and efficient yield of Shangnong 9.

Key words: Shangnong 9; wide-width sowing; planting density; yield

小麦作为最重要的粮食作物之一,对全球经济发展和食品安全具有至关重要的作用^[1]。在我国口粮消费总量中,小麦的占比约 43%,因此,在土地资源有限的情况下,不断改进小麦栽培技术,提升小麦单位面积产量,对于保障我国粮食安全有着极为重要的意义。小麦生产中,传统条播存在单行苗带窄、株间距小、田间通风透光条件差等问题,不利于小麦生长和产量提升^[2]。相较于传统条播,宽幅播种方式通过增加株间距,有效缓解了小麦个体与群体间的矛盾,实现了光热等资源的高效利用,从而协同提高产量与资源的利用效率^[3]。种植密度能影响植株个体大小和生物量的分配,在小麦群体发育中起着至关重要的作用^[4]。种植密度过低,会导致小麦群体规模不足,最终对小麦产量产生不利影响。种植密度过大则会使小麦通风透光性变差,个体变得细弱,最终加重病害的发生并降低产量^[5]。适宜的种植密度并非固定不变,多会因小麦品种^[6]、播种时间^[7]、土壤肥力^[8]以及栽培管理措施^[9-10]等不同而有所差异。随着种植密度的增加,小麦越冬、拔节期群体逐渐增多,但密度达到一定程度时,最高群体^[11]和成穗率^[12]均会有所下降。在超高产条件下,种植密度较小会造成小麦花前群体干物质积累减少,同时降低干物质运转,最终导致产量降低;种植密度较大时,由于个体发育不健壮,也会影响干物质的积累和运转,造成小麦产量的下降^[13]。小麦种植密度还会影响茎秆的机械强度、基部茎间粗度、重心高度和株高等性状^[14]。

种植密度和播种方式是作物生产中调控个体和群体的两个重要因素,也是小麦高产栽培研究的重要内容。不同小麦品种有不同的生物学特性、产量特征,因此品种在推广的过程中必须配套适宜的栽培措施才能最大程度地发挥品种特性。高产多抗小麦新品种尚农 9 是商丘市农林科学院选育的新品种(国审麦 20243004),目前关于该品种的高产栽培技术研究还未见报道。本研究分析了种植密度与播种方式互作对

冬小麦新品种尚农9植株生长和产量的影响,探索最适种植密度和最佳播种方式,旨在为该品种及其他小麦品种在当地的推广应用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于2021/2022、2022/2023两个小麦生长季在商丘市农林科学院朱庄试验示范基地进行。该试验基地位于河南省东部商丘市北部,北纬 $34^{\circ}31'31''$ 、东经 $115^{\circ}37'35''$,属暖温带半湿润季风气候,年均气温约 15°C ,年日照时数达2300 h,年降水量约660 mm,无霜期212 d。试验基地前茬作物为玉米,实行1年2熟制。土壤为两合土,土地流转已超10年,肥力均匀。

1.2 试验设计

选用品种为高产多抗的小麦新品种尚农9。播种方式设置为:M1传统条播(苗带宽2~3 cm)和M2宽幅播种(苗带宽6~8 cm);种植密度按照商丘市市场监督管理局发布的《小麦化肥农药减量增效技术规程》(DB4114/T 160—2021)推荐适宜种植密度行加减,设置为:D1(2.0×10^6 株/hm²)、D2(2.75×10^6 株/hm²)、D3(3.5×10^6 株/hm²)、D4(4.25×10^6 株/hm²)、D5(5.0×10^6 株/hm²),3次重复,共30个小区,小区面积为3.0 m×12.0 m。

试验田氮磷钾施用量为当地推荐量,氮肥(N)总施用量为240 kg/hm²,其中基肥与追量比例为5:5。磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)施用量分别为90 kg/hm²和60 kg/hm²,且均在整地前一次性施入。试验所用氮肥、磷肥、钾肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾,其质量分数依次为46%、12%、60%。氮肥追肥时期为返青至拔节期,其余管理措施与高产田相同。

1.3 测试项目与方法

1.3.1 单株分蘖

在小麦3叶期每小区选取长势基本一致的1 m双行,定点标记,在3叶期调查基本苗数,在越冬期、拔节期和孕穗期定点调查群体数,并以此计算单株分蘖数。

1.3.2 茎秆抗倒伏特征参数

成熟期取回固定点1 m双行内单株。每小区随机选取20个单茎,用于测量基部第1节、第2节、第3节间长度、重心高度和株高。株高是从分蘖节到穗顶部(不含芒)的高度。测量重心高度时,先剪去单茎的根部,然后将茎秆(包含叶片、茎鞘和穗)置于固定架上使其保持平衡,此时茎秆基部至平衡点的距离即为重心高度。

1.3.3 营养器官干物质积累量

于开花期和成熟期,在每小区内选取具有代表性的5株,分别将地上部营养器官和籽粒样品于105℃杀青20 min,于65℃烘干至恒质量,并用天平称质量,数值用于计算花后干物质转运量及对籽粒的贡献率。

1.3.4 籽粒产量及构成因素

成熟期每小区收获3个1 m样方用于考查各要素和测产。

1.4 计算公式^[15]

$$N_{\text{花前}} = N_{\text{开花期}} - N_{\text{成熟期}} \quad (1)$$

式中: $N_{\text{花前}}$ 为花前营养器官干物质转运量; $N_{\text{开花期}}$ 为开花期群体营养器官干物质积累量; $N_{\text{成熟期}}$ 为成熟期群体营养器官干物质积累量。

$$R_{\text{转运}} = N_{\text{花前}} / N_{\text{开花期}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $R_{\text{转运}}$ 为花前营养器官干物质转运效率。

$$R_{\text{贡献}} = N_{\text{花前}} / Q_{\text{成熟期}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $R_{\text{贡献}}$ 为花前营养器官干物质转运对籽粒干质量的贡献率； $Q_{\text{成熟期}}$ 为成熟期群体籽粒干质量。

1.5 数据分析

试验数据使用 Excel 2010 和 SPSS 27.0 进行分析，多重比较运用 LSD(最小显著差异)法。

2 结果与分析

2.1 种植密度与播种方式对冬小麦单株分蘖和群体的影响

种植密度与播种方式及两者互作效应对冬小麦单株分蘖数和群体具有显著影响，结果见表 1。

表 1 种植密度和播种方式对冬小麦单株分蘖和群体的影响

处理			单株分蘖数/个			群体($\times 10^7$)/(茎· hm^{-2})		
			越冬期	拔节期	孕穗期	越冬期	拔节期	孕穗期
2021/2022	M1	D1	3.01b	4.59b	2.29b	0.613 61e	0.930 92f	0.457 95e
		D2	2.36de	4.10c	1.88c	0.661 36e	1.143 08def	0.517 63d
		D3	2.11f	3.73de	1.64de	0.752 38d	1.323 36cd	0.573 15c
		D4	2.01f	3.24f	1.40f	0.871 20c	1.399 62c	0.595 72c
		D5	1.73g	2.95g	1.21g	0.883 62c	1.495 01bc	0.607 45c
	M2	D1	3.70a	5.21a	2.57a	0.754 15d	1.057 31ef	0.513 95d
		D2	3.12b	4.63b	2.20b	0.874 55c	1.293 47cde	0.604 68c
		D3	2.71c	4.19c	1.95c	0.968 04b	1.489 81bc	0.683 25b
		D4	2.42d	3.82d	1.72d	1.047 51a	1.648 04ab	0.729 45ab
		D5	2.16ef	3.52e	1.51ef	1.101 73a	1.786 22a	0.756 17a
2022/2023	M1	D1	3.09b	4.52b	2.304b	0.592 49f	0.890 53f	0.468 07f
		D2	2.48d	4.09c	2.00c	0.655 62e	1.107 10def	0.548 84de
		D3	2.16e	3.58de	1.70d	0.725 68d	1.235 51cde	0.596 60cd
		D4	2.08e	3.16f	1.47e	0.848 35c	1.322 81cd	0.624 43c
		D5	1.76f	2.75g	1.28f	0.845 53c	1.355 84bc	0.639 59c
	M2	D1	3.83a	5.16a	2.65a	0.735 08d	1.017 17ef	0.530 42e
		D2	3.24b	4.59b	2.28b	0.854 20c	1.242 36cde	0.627 66c
		D3	2.80c	4.11c	2.02c	0.939 72b	1.416 83bc	0.707 52b
		D4	2.49d	3.74d	1.78d	1.016 59a	1.566 69ab	0.755 23ab
		D5	2.17e	3.36ef	1.53e	1.042 95a	1.653 45a	0.765 03a
		D	300.03***	250.18***	251.75***	132.75***	413.34***	92.84***
		M	254.98***	343.31***	158.04***	383.09***	351.01***	187.90***
		Y	6.64*	6.07*	8.05**	7.97**	52.17***	8.65**
		D×M	0.48	5.32**	0.09	2.07	9.22***	3.78*
	D×Y	0.54	0.30	0.15	0.38	2.70*	0.12	
	M×Y	0.05	0.05	0.04	0.20	0.01	0.13	
	D×M×Y	0.05	0.04	0.08	0.05	0.06	0.11	

注：小写字母不同表示不同处理间差异有统计学意义($p < 0.05$)；*、**和***分别表示 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 和 $p < 0.001$ ，差异有统计学意义，下同。

两个生长季中, 相同种植密度和生育期下, 宽幅播种方式下单株分蘖数普遍高于传统条播方式。在越冬期宽幅播种的单株分蘖数均超过 19.0%, 拔节期、孕穗期增幅超过 12.0%, 这表明宽幅播种更有利于促进单株分蘖能力的提升。种植密度对单株分蘖数具有显著的负效应, 随着密度的增加, 植株间的竞争愈发激烈, 单株分蘖能力逐渐降低。群体数量方面, 两个生长季宽幅播种方式下的小麦群体普遍高于传统条播方式, 尤其在高密度(4.25×10^6 株/hm²、 5.0×10^6 株/hm²)条件下, 差异更为显著, 这表明宽幅播种方式更有利于冬小麦群体的生长和发育。相同播种方式下, 随着种植密度的增加, 冬小麦群体逐渐增加, 这反映了种植密度对小麦群体有直接调控作用。在传统条播方式下, 当种植密度从 2.0×10^6 株/hm² 逐步升至 5.0×10^6 株/hm² 时, 小麦群体增加幅度渐趋平缓, 相邻密度处理间小麦群体增长幅度分别为 7.78%~24.32%、8.70%~15.77%、3.94%~16.90%、-0.33%~6.82%; 在宽幅播种方式下, 当种植密度从 2.0×10^6 株/hm² 逐步升至 5.0×10^6 株/hm² 时, 小麦群体增加幅度也渐趋平缓, 相邻密度处理间小麦群体增长幅度分别为 15.96%~22.34%、10.01%~15.18%、6.74%~10.62%、1.30%~8.38%。这表明种植密度与小麦群体的关系并非简单的线性关系, 而是呈现出一种增幅逐渐减缓的趋势。

种植密度、播种方式和年份对各生育期冬小麦单株分蘖和群体的影响均达到显著水平。播种方式、种植密度对小麦单株分蘖情况以及群体特征均产生影响, 呈现出极显著差异($p < 0.001$)。种植密度与播种方式的互作效应在拔节期表现更为显著, 冬小麦单株分蘖和群体均达到极显著水平($p < 0.01$), 同时种植密度与播种方式互作对孕穗期群体也有显著影响($p < 0.05$)。另外, 种植密度与年份互作对拔节期群体的影响也达到显著水平($p < 0.05$)。相比之下, 播种方式与年份、播种方式和种植密度与年份交互作用对小麦单株分蘖和群体影响均未达到显著水平。

2.2 种植密度与播种方式对冬小麦抗倒伏指标的影响

由表 2 可知, 两个生长季中, 随着种植密度的增加, 基部节间长度(第 1 节、第 2 节、第 3 节)普遍呈现逐渐增加的趋势。不同播种方式间宽幅播种下基部节间长度普遍低于传统条播方式, 且这一差异在 2021/2022 年度更为明显。小麦重心高度与播种方式、种植密度均有关。随着种植密度的增加, 重心高度也呈现出上升趋势。不同生长季重心高度的数值变化幅度略有差异, 但整体趋势相类似。宽幅播种方式下重心高度总体较低。2021/2022 年度, 传统条播方式小麦重心高度在 57.44~59.96 cm、株高在 79.16~84.46 cm, 而宽幅播种方式小麦重心高度均低于 57.00 cm, 株高均低于 81.00 cm。这表明采用宽幅播种方式有助于缩短小麦基部节间长度, 提升小麦的抗倒伏能力。随着种植密度的增加, 株高明显增加, 表明小麦株高和种植密度间存在一定正相关。播种方式对株高的影响效应相对种植密度更小, 但宽幅播种方式下的小麦株高普遍低于传统条播方式。显著性分析进一步表明, 播种方式、种植密度对基部节间长度、重心高度和株高的影响达到极显著水平($p < 0.01$), 年份对其影响达到显著水平($p < 0.05$), 但 3 因素间仅播种方式与年份互作对重心高度和株高的影响达到显著水平($p < 0.05$)。

表 2 种植密度和播种方式对冬小麦抗倒伏指标的影响

处理	基部节间长度/cm			重心高度/ cm	株高/ cm		
	第 1 节	第 2 节	第 3 节				
2021/2022	M1	D1	6.07e	9.34bc	12.85ab	57.61ab	79.80b
		D2	6.04e	9.18c	12.13b	57.44ab	79.16b
		D3	6.63cde	9.57abc	12.70ab	57.96ab	81.42ab
		D4	7.12bc	10.27a	13.54a	58.26ab	79.97b
		D5	7.83a	10.05ab	12.76ab	59.96a	84.46a

续表 2

处理	基部节间长度/cm			重心高度/ cm	株高/ cm	
	第 1 节	第 2 节	第 3 节			
M2	D1	6.06e	9.53abc	12.92ab	56.04b	77.83b
	D2	6.07e	9.08c	11.80b	55.45b	77.79b
	D3	6.35de	9.47abc	12.31ab	55.17b	77.96b
	D4	6.93bcd	10.14ab	12.95ab	56.90ab	78.68b
	D5	7.34ab	9.86abc	12.64ab	56.77ab	80.64ab
2022/2023 M1	D1	5.76d	9.25bcde	12.31abc	57.37bc	79.13bcd
	D2	5.99cd	9.18cde	12.24abc	56.71bcd	79.00bcd
	D3	7.12ab	9.56abcd	12.65ab	57.86abc	80.47abc
	D4	7.30a	9.99ab	12.89a	58.74ab	81.27ab
	D5	7.23ab	10.25a	13.05a	60.11a	83.77a
M2	D1	5.77d	8.62e	11.62bc	54.57de	75.18de
	D2	5.84d	8.80de	11.26c	53.75e	75.46de
	D3	6.05cd	9.17cde	12.45ab	53.22e	74.63e
	D4	6.61bc	9.77abc	12.15abc	55.61cde	76.57cde
	D5	6.76ab	9.55abcd	12.42abc	54.68de	77.15cde
D		34.17***	12.78***	4.62***	3.87**	5.59**
M		12.72***	5.79**	8.01***	55.62***	42.55***
Y		4.67*	4.65*	4.81*	5.00*	7.27°
D×M		1.93	3.30	1.29	1.16	0.92
D×Y		1.56	0.51	1.49	0.12	0.32
M×Y		2.36	0.17	0.26	4.54*	5.16°
D×M×Y		0.73	0.33	0.29	0.08	0.05

2.3 种植密度与播种方式对冬小麦营养器官干物质转运的影响

由表 3 可知, 种植密度对营养器官干物质转运量、转运效率和贡献率的影响均达到极显著水平 ($p < 0.01$)。两个生长季相同播种方式下, 随着种植密度的增加, 营养器官干物质转运量、转运效率、贡献率均表现出先上升后下降的趋势。传统条播方式下, 种植密度 D3 (3.5×10^6 株/hm²) 处理的转运量、转运效率和贡献率最高, 但在宽幅播种方式下, 种植密度 D3 (3.5×10^6 株/hm²) 或 D4 (4.25×10^6 株/hm²) 处理的转运量、转运效率和贡献率相对更高。不同播种方式处理间的营养器官干物质转运量、转运效率和贡献率存在显著差异 ($p < 0.01$), 宽幅播种方式处理的转运量、转运效率和贡献率整体上高于传统条播方式。年份对转运量、转运效率和贡献率的影响均达到极显著水平 ($p < 0.01$)。

从方差分析结果可以看出, 播种方式、种植密度和年份 3 因素的交互作用对营养器官干物质转运量、转运效率和贡献率的影响均未达到显著水平。

表 3 种植密度和播种方式对冬小麦营养器官干物质转运的影响

处理		转运量/(kg·hm ⁻²)	转运效率/%	贡献率/%	
2021/2022	M1	D1	1 098.18c	17.52cd	14.32ab
		D2	1 202.44bc	19.16c	14.72ab
		D3	1 323.73ab	19.46bc	15.33a
		D4	1 250.28abc	17.45cd	14.88ab
		D5	1 111.46c	15.79d	14.00ab
	M2	D1	1 175.98bc	21.33ab	13.54b
		D2	1 315.98ab	22.87a	14.52ab
		D3	1 428.76a	22.14a	14.55ab
		D4	1 348.19ab	19.50bc	13.47b
		D5	1 247.50abc	18.37c	13.34b
2022/2023	M1	D1	1 124.89c	18.88de	15.10c
		D2	1 309.19abc	19.75de	16.53abc
		D3	1 450.84ab	20.04cde	17.64a
		D4	1 392.79ab	18.06ef	17.34ab
		D5	1 250.41bc	16.61f	15.60bc
	M2	D1	1 267.63bc	20.64bcd	15.02c
		D2	1 382.77ab	22.15abc	15.74bc
		D3	1 405.03ab	22.69ab	16.18abc
		D4	1 490.82a	24.15a	16.03abc
		D5	1 327.03abc	19.35de	14.77c
	D		10.60***	23.38***	5.29**
	M		10.24**	102.14***	12.91**
	Y		10.80**	8.40**	56.06***
	D×M		0.15	0.80	1.96
D×Y		0.10	0.79	0.20	
M×Y		0.46	0.08	0.08	
D×M×Y		0.23	0.13	0.83	

2.4 种植密度与播种方式对冬小麦产量的影响

由表 4 可知, 小麦有效穗数、穗粒数、千粒质量和产量受种植密度的影响达到极显著水平($p < 0.001$)。两个生长季中, 随着种植密度的增加, 小麦有效穗数呈现出明显的上升趋势, 但穗粒数、千粒质量呈现下降趋势, 小麦产量呈现先增加后降低的趋势, 在适宜种植密度(3.5×10^6 株/hm² 或 4.25×10^6 株/hm²)下产量最高。播种方式对小麦有效穗数、穗粒数、千粒质量以及最终产量均有显著的影响($p < 0.01$)。在相同种植密度下, 宽幅播种方式的有效穗数和产量普遍高于传统条播方式, 在较高种植密度(3.5×10^6 株/hm² 和 4.25×10^6 株/hm²)下宽幅播种优势更为明显, 增产在 13.72% 以上。种植密度、播种方式和年份均显著影响小麦的产量及构成要素。宽幅播种方式的千粒质量普遍低于传统条播方式, 但差异不明显。年份因素对千粒质量和产量的影响达到极显著水平($p < 0.001$)。

种植密度与播种方式交互作用对小麦有效穗数和产量的影响达到极显著水平($p < 0.01$), 播种方式和

年份的交互作用对小麦的穗粒数和千粒质量的影响达到极显著水平($p < 0.001$), 对籽粒产量的影响达到显著水平($p < 0.05$)。其余因素间的交互作用对小麦产量及其构成要素的影响未达到显著水平。综上表明: 宽幅播种适配 4.25×10^6 株/hm² 可协调小麦生长、提高产量, 是尚农 9 稳产高产高效的最优组合。

表 4 种植密度和播种方式对冬小麦产量的影响

处理			有效穗数($\times 10^6$)/ (穗·hm ⁻²)	穗粒数/ (粒·穗 ⁻¹)	千粒质量/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)
2021/2022	M1	D1	4.786 5e	43.43ab	41.51a	8 207.46e
		D2	5.274 7d	41.17bc	40.87ab	8 746.33d
		D3	5.778 8c	39.14c	40.26abc	9 243.75c
		D4	5.964 7c	36.82d	39.64abcd	8 998.63cd
		D5	6.052 4c	34.45d	38.78bcde	8 705.33d
	M2	D1	5.334 5d	44.77a	39.18bcde	8 995.04cd
		D2	6.161 9c	43.00ab	38.60cde	9 699.72b
		D3	6.889 0b	41.14bc	38.03cde	10 512.22a
		D4	7.287 2a	39.40c	37.48de	10 605.75a
		D5	7.535 0a	36.49d	37.03e	10 010.63b
2022/2023	M1	D1	5.021 5f	44.10a	39.70a	7 444.49d
		D2	5.547 5e	42.41ab	38.77ab	7 913.71c
		D3	5.916 1d	40.87bc	38.09abc	8 215.27bc
		D4	6.169 1cd	39.20cde	37.14bcd	8 020.51c
		D5	6.301 0c	37.09e	36.26d	8 005.57c
	M2	D1	5.392 8e	44.20a	39.54a	8 048.03c
		D2	6.282 4c	42.37ab	38.66ab	8 542.80b
		D3	6.998 9b	40.87bc	37.85bcd	9 292.45a
		D4	7.329 4a	39.51cd	37.12bcd	9 346.56a
		D5	7.396 1a	37.40de	36.53cd	8 977.34a
		D	146.77***	65.80***	13.86***	42.06***
		M	362.67***	9.95**	16.87***	275.51***
		Y	6.29*	6.08*	19.16***	244.44***
		D×M	9.01***	0.14	0.13	4.83**
	D×Y	0.20	0.89	0.28	0.85	
	M×Y	3.10	7.51***	15.32***	4.29*	
	D×M×Y	0.32	0.07	0.01	0.06	

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 种植密度和播种方式对冬小麦单株分蘖和群体的影响

小麦产量由单位面积内的有效穗数、穗粒数和千粒质量共同影响, 产量的高低取决于这 3 个因素是否协调统一。在小麦生产中, 环境条件和农艺措施等方面的差异会导致该 3 因素发生改变, 从而影响小麦产

量^[16]。构建合理群体结构是小麦获得高产的基础, 而茎蘖动态作为重要特征, 对小麦产量有着直接的影响。早发分蘖在生长过程中有更长的时间进行养分的积累和生长发育, 这不仅有助于形成健壮的穗部结构, 还能提高成穗率^[17]。合理的行距配置有利于协调作物的群体数量和个体质量, 从而实现增产。宽幅播种方式是在传统条播的基础上, 通过扩大株间距来提高群体通风透光性能, 从而促进个体健壮。

本研究结果显示, 宽幅播种方式下单株分蘖数普遍高于传统条播方式, 在越冬期单株分蘖数增幅超 19.0%, 拔节期、孕穗期超 12.0%。这是因为宽幅播种为小麦单株提供了更充足的生长空间, 减少了资源竞争, 更有利于植株个体的生长和发育。种植密度对冬小麦个体质量和群体具有直接调控作用。随着种植密度的增加, 植株间的竞争愈发激烈, 小麦单株分蘖能力逐渐降低; 同时, 随着种植密度的增加, 冬小麦群体逐渐增加, 但增加幅度并非简单的线性关系, 而是呈现出增幅逐渐减缓的趋势。肖丽丽^[18]发现随着种植密度的增加, 群体分蘖增大, 但增幅逐渐降低。王飞等^[19]认为在高密度下, 资源竞争激烈, 无法满足分蘖生长所需的能量和物质供应, 导致小麦单株分蘖数下降, 这与本研究结论相一致。

种植密度与播种方式对冬小麦的单株分蘖数和群体有显著影响。本研究结果表明, 随着种植密度的增加, 宽幅播种方式下的单株分蘖数增幅逐渐减小, 甚至可能出现负增长。这说明不同的播种方式在高密度条件下均会因为植株间的竞争导致分蘖生长受限。拔节期是小麦生长的关键时期, 植株间的竞争和资源利用率直接影响着小麦的生长和发育。本研究中, 播种方式与种植密度的互作在拔节期对冬小麦单株分蘖和群体的影响均达到极显著水平($p < 0.01$)。

3.1.2 种植密度和播种方式对冬小麦抗倒伏指标的影响

在小麦实际生产过程中, 茎秆倒伏现象最为常见, 倒伏是致使小麦产量降低的主要因素之一。研究表明, 茎秆基部节间长度, 尤其是第 2 节的长度与倒伏指标呈极显著正相关, 基部茎节越短, 小麦茎秆抗倒能力越强^[20]。赵小红等^[21]指出, 降低株高是提高植株抗倒伏最为有效的措施。朱新开等^[22]认为, 矮秆和较低的重心高度有利于小麦抗倒性能的提高。李欣欣等^[23]指出, 与传统条播方式相比, 在相同种植密度条件下, 宽幅播种的小麦茎秆更粗壮、茎壁更厚, 基部第 2 节间的机械强度提升 9.3% 以上, 茎粗增加 7.3% 以上, 株高降低 1.9% 以上, 重心高度降低 6.0% 以上。本研究发现, 宽幅播种方式下基部茎节长度普遍低于传统条播方式。在高密度条件下, 小麦植株间资源竞争加剧, 为了获取更多光照资源, 植株通过增加节间长度来提升自身高度, 以此能在群体中占据更有利的空间位置^[24]。茎秆基部第 2 节间的机械强度降低, 会增加倒伏发生的可能性^[25]。韩玉林等^[26]研究发现, 作物的重心高度与倒伏风险之间存在正向关联, 当重心高度超出特定界限时, 倒伏的概率将显著增加。本研究结果表明, 随着种植密度的增加, 小麦基部节间的长度(第 1 节、第 2 节、第 3 节)普遍呈现逐渐增加的趋势, 这也增加了倒伏的风险, 与冯学颖等^[27]的研究结果相吻合。

播种方式对株高的影响达到极显著水平($p < 0.001$), 但宽幅播种方式下的小麦株高普遍低于传统条播方式。显著性分析结果进一步表明, 播种方式、种植密度和年份对基部节间长度、重心高度和株高具有显著影响。3 因素间仅播种方式与年份的交互作用对重心高度和株高有显著影响。这应该是不同年份的气候条件、土壤状况等因素存在差异, 导致小麦植株的生长环境发生变化, 从而影响种植密度和播种方式对小麦生长特性的作用效应。

3.1.3 种植密度和播种方式对冬小麦营养器官干物质积累与运转的影响

小麦籽粒产量的形成依赖于开花前营养器官储存干物质的转运以及开花后光合同化物的积累^[28-29]。Matsuyama 等^[30]研究表明, 降低种植密度可以增加小麦花前营养器官贮藏干物质在花后向籽粒的转运量。本研究发现, 种植密度对营养器官干物质的转运量、转运效率和贡献率具有显著影响($p < 0.01$), 这一结果与众多研究相吻合^[31]。陈猛等^[32]的研究发现, 随着种植密度的增加, 小麦营养器官的干物质转运量呈现先增后降的趋势。这主要是由于高密度条件下植株间的竞争导致光照和营养分配不均, 影响干物质的积累和转运^[33]。本研究中, 两种播种方式条件下, 当种植密度为 D3(3.5×10^6 株/hm²) 或 D4

(4.25×10^6 株/hm²)时,营养器官干物质的转运量、转运效率和贡献率均表现出较高的水平,这说明适宜的种植密度对于优化作物营养器官干物质转运尤为重要。

不同播种方式之间营养器官干物质转运量、转运效率和贡献率存在极显著差异($p < 0.01$)。宽幅播种方式相较于传统条播方式,整体上提高了转运量、转运效率和贡献率。这一结论与邵敏敏等^[34]的研究结果一致,他们指出宽幅播种通过改善植株间的通风透光条件,促进了干物质的积累和转运,从而提高了作物的产量和品质。宽幅播种方式优化了植株间的空间分布,改善了根系生长环境,减少了植株间的竞争,有利于营养器官干物质的高效转运。

年份对营养器官干物质转运量、转运效率和贡献率的影响均达到极显著水平($p < 0.01$)。这应该是因为不同年份的气候条件(如温度、降雨量和光照强度)存在差异,直接影响作物的生长发育和干物质积累。这一观点与苏海报等^[35]研究一致,他们发现气候变化对作物干物质转运和产量具有显著影响。

3.1.4 种植密度和播种方式对冬小麦产量的影响

种植密度是影响小麦有效穗数、穗粒数、千粒质量和最终产量的关键因素之一。孔令英等^[36]、付亮等^[37]研究指出,适当增加种植密度能显著增加小麦产量,但过高的密度会导致小麦产量降低。本研究也得到相似的结果,小麦产量随着种植密度的增加先上升后下降。在适宜种植密度(传统条播 3.5×10^6 株/hm²,宽幅播种 4.25×10^6 株/hm²)下,小麦产量达到最高。本研究还发现,随着种植密度的增加,小麦成熟期群体呈现出明显的上升趋势,穗粒数与千粒质量却呈下降趋势。这一结果与Tao等^[38]、Zhu等^[39]的研究结论基本相符,即随着单位面积穗数增加,单穗粒质量会因穗粒数和千粒质量的减少而降低。这主要是由于群体过大导致了个体生长空间受限,小麦植株之间对光照、水分、养分等资源的竞争愈发激烈。在高密度条件下,小麦植株的营养生长和生殖生长失衡,分配到每个穗子和每粒种子的光合产物减少,使得穗粒数减少,籽粒发育不良,导致千粒质量降低。

播种方式极显著影响着小麦的有效穗数,进而对穗粒数、千粒质量和产量的影响也达到了极显著水平。在相同种植密度下,宽幅播种方式的群体穗数和产量普遍高于传统条播方式,在较高种植密度(3.5×10^6 株/hm²或 4.25×10^6 株/hm²)下优势更为明显。这是因为宽幅播种能够改善小麦群体的通风透光条件,减少植株之间的竞争压力,有利于根系的生长和发育,提高了对土壤养分和水分的吸收效率,从而促进了有效穗数的增加和产量的提高。宽幅播种方式的千粒质量普遍低于传统条播方式,但差异不明显。

年份对小麦的有效穗数和穗粒数的影响达到显著水平($p < 0.05$),对千粒质量和产量的影响达到极显著水平($p < 0.001$)。不同年份的环境条件,如温度、降水、光照时长和强度、病虫害发生情况等因素会使小麦产量发生一定变化。

种植密度、播种方式和年份及它们之间的交互作用对小麦生长和产量的影响强度因指标而异。种植密度与播种方式的交互作用对有效穗数和产量的影响达到极显著水平($p < 0.01$)。适宜的种植密度与宽幅播种方式相结合,能够更好地调节小麦的群体结构,优化群体与个体的关系,从而提高产量。播种方式与年份的交互作用对小麦穗粒数和千粒质量有极显著影响($p < 0.001$),对产量有显著影响($p < 0.05$)。这表明在实际生产中,需要根据具体年份的环境条件和播种方式来调整种植密度,以实现小麦的高产稳产。其它因素间的交互作用对小麦产量的影响未达到显著水平。这说明种植密度、播种方式和年份3因素及其两两交互作用对小麦的生长和产量起到了关键作用。

3.2 结论

相较于传统条播方式,宽幅播种方式能显著提高冬小麦的单株分蘖数,在越冬期、孕穗期的表现更显著。种植密度对单株分蘖数呈现出显著的负效应,随种植密度的递增,单株分蘖力逐步下降。宽幅播种方式下小麦群体普遍高于传统条播方式,在高密度条件下差异显著。种植密度对小麦群体有直接调控作用,但两者之间的关系并非简单的线性关系,而是呈现出增幅逐渐减缓的趋势。播种方式和种植密度对各生育

期冬小麦单株分蘖和群体的影响达到极显著水平($p < 0.001$), 年份对其影响达到显著水平($p < 0.05$)。播种方式与种植密度的互作效应在拔节期对单株分蘖和群体的影响均达到极显著水平($p < 0.01$)。

随着种植密度增加, 基部节间长度逐渐增加。宽幅播种方式下基部节间长度普遍低于传统条播方式, 且不同年份存在差异。小麦重心高度与种植密度和播种方式密切相关, 随着种植密度的增加, 小麦重心高度和株高均呈现上升趋势。宽幅播种方式下小麦重心高度和株高总体较低, 这有利于增强植株的抗倒伏性。播种方式、种植密度和年份对基部节间长度、重心高度和株高均有显著影响, 3 因素间仅播种方式与年份的交互作用对重心高度和株高的影响达到显著水平($p < 0.05$)。

种植密度对营养器官干物质的转运量、转运效率和贡献率有显著作用。在相同的播种方式下, 随密度增加, 均呈现出先上升后下降的趋势。不同播种方式间存在显著差异, 宽幅播种方式整体较高。年份对其也有显著影响, 但 3 因素交互对其影响未达到显著水平。

随着种植密度的增加, 小麦成熟期有效穗数呈现上升趋势, 穗粒数和千粒质量呈现下降趋势。小麦产量随着种植密度的增加呈现先增后降的趋势, 在适宜密度(传统条播 3.5×10^6 株/hm², 宽幅播种 4.25×10^6 株/hm²)下产量达到最高值。在较高种植密度下, 宽幅播种方式比传统条播方式产量增产在 13.72% 以上。年份对有效穗数和穗粒数的影响达到显著水平($p < 0.05$), 对千粒质量和产量的影响达到极显著水平($p < 0.001$)。种植密度和播种方式间的交互作用, 对小麦有效穗数和产量的影响达到极显著水平($p < 0.01$); 播种方式与年份的交互作用对穗粒数、千粒质量的影响达到极显著水平($p < 0.001$), 对产量的影响达到显著水平($p < 0.05$)。

参考文献:

- [1] 吴祯, 张保军, 海江波, 等. 不同种植方式对冬小麦花后干物质积累与分配特征及产量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2017, 37(10): 1377-1382.
- [2] 段剑钊, 李世莹, 郭彬彬, 等. 宽幅播种对冬小麦群体质量及产量的影响 [J]. 核农学报, 2015, 29(10): 2013-2019.
- [3] HONG S Z, JIAO F L, LI M, et al. Effects of Delayed Irrigation and Different Planting Patterns on Carbon Emissions and Yield of Winter Wheat in the North China Plain [J]. Irrigation Science, 2023, 41(3): 365-377.
- [4] LUO C L, ZHANG X F, DUAN H X, et al. Allometric Relationship and Yield Formation in Response to Planting Density under Ridge-Furrow Plastic Mulching in Rainfed Wheat [J]. Field Crops Research, 2020, 251: 107785.
- [5] ZHOU C C, HUANG Y C, JIA B Y, et al. Optimization of Nitrogen Rate and Planting Density for Improving the Grain Yield of Different Rice Genotypes in Northeast China [J]. Agronomy, 2019, 9(9): 555.
- [6] 孙蒙蒙. 河南省小麦主导品种适宜密度及播期的研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
- [7] 雷钧杰, 宋敏. 播种期与播种密度对小麦产量和品质影响的研究进展 [J]. 新疆农业科学, 2007, 44(S3): 138-141.
- [8] 邓西平, 山仑, 稻永忍, 等. 密度、施肥对旱地春小麦产量、水分利用效率和籽粒养分含量的补偿效应(英文) [J]. 西北植物学报, 2003, 23(11): 1861-1870.
- [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): 225-232.
- [10] 乔玉强, 曹承富, 杜世州, 等. 氮肥运筹和播种密度对晚播小麦群体总茎数及产量的影响 [J]. 华北农学报, 2014, 29(2): 204-207.
- [11] 张保军, 由海霞, 海江波, 等. 面条专用小麦生长发育和产量及品质的密度效应研究 [J]. 西北农业学报, 2002, 11(3): 29-32.
- [12] 马耕, 田培培, 张海艳, 等. 播期和密度对豫农 907 小麦群体动态、产量及品质的影响 [J/OL]. 河南农业大学学报, (2025-04-08) [2025-10-20]. <https://link.cnki.net/urlid/41.1112.s.20250407.1621.006>.
- [13] 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.
- [14] 李金才, 陈峰. 播种密度对小麦茎秆大维管束系统和穗部发育的影响 [J]. 安徽农业科学, 1996, 24(3): 217-219.

- [15] DORDAS C. Dry Matter, Nitrogen and Phosphorus Accumulation, Partitioning and Remobilization as Affected by N and P Fertilization and Source-Sink Relations [J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 30(2): 129-139.
- [16] 李向东, 张德奇, 王汉芳, 等. 越冬前增温对小麦生长发育和产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 839-846.
- [17] 武厥彬. 春小麦分蘖在高产栽培条件下的利用 [J]. *新疆农业科学*, 1986, 23(6): 4-5.
- [18] 肖丽丽. 不同地力水平条件下种植密度对冬小麦籽粒产量和氮素利用率的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [19] 王飞, 徐梦彬, 周娜娜, 等. 不同播期、种植密度对华麦 11 农艺性状、产量及品质的影响 [J]. *江西农业学报*, 2024, 36(11): 8-13.
- [20] 董琦, 王爱萍, 梁素明. 小麦基部茎节形态结构特征与抗倒性的研究 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2003, 23(3): 188-191.
- [21] 赵小红, 白羿雄, 姚有华, 等. 禾谷类作物茎秆特性与茎倒伏关系的研究 [J]. *植物生理学报*, 2021, 57(2): 257-264.
- [22] 朱新开, 王祥菊, 郭凯泉, 等. 小麦倒伏的茎秆特征及对产量与品质的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(1): 87-92.
- [23] 李欣欣, 石祖梁, 王久臣, 等. 施氮量和种植密度对稻茬晚播小麦干物质积累及光合特性的影响 [J]. *华北农学报*, 2020, 35(5): 140-148.
- [24] 胡昊. 小麦茎秆特性与抗倒伏关系及其调控研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
- [25] 张培文, 闫素辉, 张从宇, 等. 沿淮地区小麦茎秆抗倒伏能力与基部节间性状的关系 [J]. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(5): 41-49.
- [26] 韩玉林, 殷贵鸿, 杨光宇, 等. 小麦品种周麦 22 茎秆生长特性及其与抗倒性的关系 [J]. *作物杂志*, 2017(2): 34-37.
- [27] 冯学颖, 米俊珍, 刘景辉, 等. 宽幅条播和种植密度对燕麦茎秆抗倒伏性能的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(4): 513-521.
- [28] 刘雨杭, 赵书宏, 祝婷婷, 等. 二氢赤霉素对不同种植密度下小麦抗倒伏能力及产量的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(12): 1606-1618.
- [29] TWIZERIMANA A, NIYIGABA E, MUGENZI I, et al. The Combined Effect of Different Sowing Methods and Seed Rates on the Quality Features and Yield of Winter Wheat [J]. *Agriculture*, 2020, 10(5): 153.
- [30] MATSUYAMA H, OOKAWA T. The Effects of Seeding Rate on Yield, Lodging Resistance and Culm Strength in Wheat [J]. *Plant Production Science*, 2020, 23(3): 322-332.
- [31] 殷复伟, 王文鑫, 谷淑波, 等. 株行距配置对宽幅播种小麦产量形成的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(6): 710-717.
- [32] 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): 238-244.
- [33] 崔梦, 章星传, 闫素辉, 等. 高密度下不同小麦品种干物质积累及产量构成分析 [J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(16): 41-43, 62.
- [34] 邵敏敏, 黄玲, 徐兴科, 等. 不同行距与苗带宽度互作对宽幅精播小麦产量形成的影响 [J]. *山东农业科学*, 2019, 51(4): 30-34.
- [35] 苏海报, 周云, 肖敏光, 等. 气候变暖对水稻干物质积累和运转的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(24): 81-85.
- [36] 孔令英, 赵俊晔, 张振, 等. 宽幅播种下基本苗密度对小麦旗叶光合特性及叶片和根系衰老的影响 [J]. *应用生态学报*, 2023, 34(1): 107-113.
- [37] 付亮, 蒋志凯, 夏彦丽, 等. 种植密度对新麦 35 产量和生理学特性的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(14): 18-19, 79.
- [38] TAO Z Q, MA S K, CHANG X H, et al. Effects of Tridimensional Uniform Sowing on Water Consumption, Nitrogen Use, and Yield in Winter Wheat [J]. *The Crop Journal*, 2019, 7(4): 480-493.
- [39] ZHU Y G, CHU J P, DAI X L, et al. Delayed Sowing Increases Grain Number by Enhancing Spike Competition Capacity for Assimilates in Winter Wheat [J]. *European Journal of Agronomy*, 2019, 104: 49-62.