

密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响

曹倩, 贺明荣*, 代兴龙, 门洪文, 王成雨

(山东农业大学农学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要: 为了探明小麦产量和氮素利用效率同步提高的最佳施氮量和种植密度, 制定合理的栽培措施, 为实现高产高效提供理论依据, 以大穗型品种泰农 18(T18)和中穗型品种山农 15(S15)为试材, 在大田条件下设置 4 个播种密度(60、75、90 和 105 kg/hm²)和 3 个施氮水平(0、180 和 240 kg/hm²), 研究了氮密互作对小麦子粒产量和氮素利用效率的影响。结果表明, 播种密度和施氮量均显著影响冬小麦产量及构成因素, 且两者间存在明显的互作效应; 两因素中密度是导致产量变化的主导因素。子粒产量提高引起氮肥农学利用效率和氮肥吸收利用率的协同提高。综合考虑产量和氮素利用效率等因素, 在本试验条件下, 泰农 18 的适宜播量为 102 kg/hm², 适宜的施氮量为 180 kg/hm²; 而山农 15 的适宜播量为 83 kg/hm², 适宜的施氮量为 180 kg/hm²。说明在冬小麦高产栽培过程中, 可以通过调节施氮量和播种密度, 充分利用氮密互作效应, 在提高氮素利用率的同时获得较高的子粒产量。

关键词: 小麦; 密度; 氮肥; 产量; 氮素利用效率

中图分类号: S512.1.061.01

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)04-0815-08

Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat

CAO Qian, HE Ming-rong*, DAI Xing-long, MEN Hong-wen, WANG Cheng-yu

(College of Agronomy, Shandong Agricultural University/National Key Laboratory of Crop Biology, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: In order to verify the optimum nitrogen application rate and planting density for higher grain yield and nitrogen use efficiency, and to provide basis for the development of rational cultivation measures, two cultivars, Tainong18(T18) and Shannong15(S15) representing large and middle ears respectively were used in this study. Under field condition, four regimes of planting density (60, 75, 90 and 105 kg/ha) and three nitrogen rates (0, 180 and 240 kg/ha) were applied to study the interaction between nitrogen and density on grain yield and nitrogen use efficiency of wheat. The results show that planting density, nitrogen rate and the interaction between them have significant effects on grain yield and yield components of winter wheat. Compared with the nitrogen rates, planting density is a key factor for increasing the grain yield, and for increasing the agronomic efficiency and apparent recovery efficiency of applied N. In this study, taking both grain yield and nitrogen use efficiency into consideration, the appropriate plant density and nitrogen rate of T18 are 102 kg/ha and N 180 kg/ha respectively, while for S15 are 83 kg/ha and N180 kg/ha. Conclusively, we can adjust nitrogen rate and planting density to take advantage of the interaction between them in promoting the uptake and use of nitrogen for high grain yield and in improving nitrogen utilization.

Key words: wheat; density; nitrogen; yield; nitrogen use efficiency

氮素对促进小麦生长发育, 提高分蘖成穗率和促进穗多、穗大、增加粒重具有重要的作用^[1-3]。生产产中为了提高小麦产量, 氮肥被大量投入农田, 但氮肥利用率较低^[4]。目前, 世界范围内氮肥的平均利

收稿日期: 2010-12-23

接受日期: 2011-03-06

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: 曹倩(1985—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事小麦栽培生理的研究。E-mail: fighter91@163.com

* 通讯作者 E-mail: mrhe@sdaa.edu.cn

用率约为 33%^[5]。低氮肥利用率不仅造成资源的巨大浪费,而且严重污染了环境,带来了一系列的环境和社会问题^[6-9]。

小麦的产量除主要受遗传因子影响外,还受生态环境和栽培措施的影响。在各种栽培措施中,种植密度与氮素营养对小麦产量和品质的影响最为突出^[10-11]。长期以来,相关研究大多侧重密度或氮肥单个因子对小麦产量的影响。研究认为,密度适宜,个体健壮,群体质量高,个体和群体在一定的时间和空间范围内协调生长,可得到穗、粒、重的最佳组合,从而获得较高的产量^[12];关于施用氮肥对小麦子粒产量的影响,大多研究认为,施氮量与子粒产量呈抛物线关系,在一定的施氮范围内,施氮量与产量呈正相关,但超过一定范围,产量增加不显著甚至降低^[13-16]。

1974 年 O'Sullivan 和 Gabelman 等^[17]提出了氮素利用效率的概念。氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率和氮肥偏生产力是用来表示氮肥利用率的常用量化指标,他们从不同的侧面描述了作物对氮素或氮肥的利用效率^[18]。许多研究表明,氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力随施氮量增加而降低^[19-22]。

有关氮肥或密度单个因子对小麦生长发育、产量品质形成调控效应的研究已有很多,而对于两者的互作效应对产量特别是氮素利用效率的研究还鲜见报道。本试验设置不同种植密度和施氮量,探讨氮密互作条件下小麦高效吸收利用氮素的特性,旨在探明产量和氮素资源利用效率同步提高的最佳施氮量和种植密度的平衡点,为制定合理的栽培措施,实现高产高效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2008 ~ 2009 和 2009 ~ 2010 连续两年在山东农业大学试验农场进行。该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/cm²,年均日照数 2627.1 h。年平均气温 12℃,年平均 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温 4731℃, $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温 4213℃,无霜期平均为 195 d,年均降水量 697 mm。试验地 0 ~ 20 cm 土层的有机质含量为 11.92 g/kg,全氮 0.87 g/kg,碱解氮 112.4 mg/kg,速效磷 32.8 mg/kg,速效钾 81 mg/kg。

试验采用裂区设计,主区为泰农 18(T18)和山农 15(S15)2 个小麦品种;裂区设 60 kg/hm²(D60)、75 kg/hm²(D75)、90 kg/hm²(D90)和 105

kg/hm²(D105)4 个播种量,次裂区设置 N 0 kg/hm²(N0)、180 kg/hm²(N180)和 240 kg/hm²(N240)3 个氮肥用量,共计 24 个处理。每处理小区面积为 24 m²,重复 3 次。

小麦于 2008 年 10 月 10 日和 2009 年 10 月 10 日播种。各处理均施 P₂O₅ 120 kg/hm²(过磷酸钙,含 P₂O₅ 15%),K₂O 105 kg/hm²(氯化钾,含 K₂O 60%),氮肥为尿素(含 N 46%),按试验设计要求(基追比 3:7)施入。全部磷、钾肥和底施的尿素于播种前均匀撒施于各小区后耕翻,其它尿素于拔节期开沟追施,然后埋严并浇水,灌水量 600 m³/hm²。播种方式、灌水时期、病虫害防治、收获方式等管理措施同高产田。

1.2 测定项目与方法

成熟期测产,采用小区计产,每个小区收获 3 m²,重复 3 次,风干,脱粒后测产并进行室内考种。

植株按普通叶、旗叶、茎秆、颖壳和子粒烘干、称重,粉碎后用浓 H₂SO₄ 和 H₂O₂ 消煮半微量凯氏定氮法^[23]测定各器官全氮的含量。

有关参数计算:

植株总的氮素积累量 = 成熟期单株干重 × 成熟期单株含氮量(%) × 密度^[24];

氮肥农学利用率 = (施氮区子粒产量 - 无氮区子粒产量)/施氮量^[4];

氮肥吸收利用率(%) = (施氮区氮素吸收量 - 无氮区氮素吸收量)/施氮量 × 100^[4];

氮肥偏生产力 = 施氮区产量/施氮量^[25];

氮素养分利用效率 = 子粒产量/植株氮素积累量^[4]。

因两年试验结果基本一致,采用两年数据的平均值进行分析。统计分析和差异显著性检验用 DPS7.05 版数据处理系统分析,用 LSD 法进行显著性测验。

2 结果分析

2.1 氮肥与密度互作对产量及其构成因素的影响

施氮量和种植密度对产量构成因素均有显著影响。由表 1 可知,T18 和 S15 的单位面积有效穗数随着施氮量和密度的增加而提高。两品种最大有效穗数都出现在 D105、N240 处理。穗粒数随着施氮量的增加而增多,但随着种植密度增大而呈现降低的趋势,T18、S15 均以 D60、N240 处理最多,每穗分别为 50.5 和 33.55 粒。千粒重均随施氮量和种植密度提高而降低,以 D60、N0 处理最高,分别达

41.74 和 51.99 g。

氮肥水平和种植密度显著影响小麦子粒产量。施氮量相同条件下,两个品种的子粒产量均表现为随播种量增加先提高后降低的趋势,但两品种达到最高子粒产量的播种量不一致。其中,大穗型品种泰农 18 的子粒产量以播量为 90 kg/hm² 处理的最高,而中穗型品种山农 15 的子粒产量以播量为 75 kg/hm² 的处理最高。播种量相同条件下,随施氮量增加,两品种的子粒产量均表现为提高的趋势,但由

N180 增至 N 240 kg/hm² 时,产量提高幅度显著降低。在达到最高子粒产量的播种量条件下,两施氮处理的子粒产量差异不显著。

方差分析表明,品种、施氮量和密度均能显著影响小麦的产量($F=50.13$ 、 3140.14 和 2100.76);而且品种和密度之间,氮肥和密度之间,以及品种、氮肥和密度之间,存在显著的互作效应($F=903.69$ 、 23.71 、和 5.67),但品种和氮肥之间的交互作用不显著($F=1.64$)。

表 1 不同处理对小麦产量及其构成因素的影响
Table 1 Effects of different treatments on grain yield and its components of wheat

品种 Cultivar	密度 Density	施氮量 N rate (kg/hm ²)	穗数 Spike ($\times 10^4$ /hm ²)	穗粒数 Kernel No. (No./spike)	千粒重 1000-kernel wt. (g)	子粒产量 Grain yield (kg/hm ²)
泰农 18 T18	D60	0	386.36 $\pm$ 5.42 i	49.37 $\pm$ 2.26 abc	41.74 $\pm$ 1.11 a	7829.16 $\pm$ 30.60 k
		180	398.69 $\pm$ 6.11 h	50.27 $\pm$ 1.21 a	41.17 $\pm$ 1.04 ab	8239.56 $\pm$ 33.52 i
		240	421.35 $\pm$ 6.42 g	50.50 $\pm$ 0.60 a	39.40 $\pm$ 1.02 cde	8344.97 $\pm$ 32.05 h
	D75	0	407.03 $\pm$ 3.74 h	48.93 $\pm$ 0.78 abcd	40.77 $\pm$ 1.04 abc	8108.07 $\pm$ 36.00 j
		180	444.03 $\pm$ 4.08 f	49.07 $\pm$ 1.08 abcd	39.84 $\pm$ 0.98 bcd	8654.01 $\pm$ 30.00 e
		240	461.03 $\pm$ 3.74 d	49.80 $\pm$ 1.66 ab	38.58 $\pm$ 0.90 def	8746.60 $\pm$ 44.07 d
	D90	0	450.03 $\pm$ 4.08 ef	47.77 $\pm$ 1.88 cde	40.30 $\pm$ 0.89 abc	8526.92 $\pm$ 32.11 f
		180	483.53 $\pm$ 5.75 c	48.20 $\pm$ 1.20 bcde	39.68 $\pm$ 0.71 bcde	9242.95 $\pm$ 37.04 a
		240	505.53 $\pm$ 5.74 b	48.43 $\pm$ 1.03 bcde	38.12 $\pm$ 0.99 ef	9293.35 $\pm$ 26.01 a
	D105	0	454.53 $\pm$ 4.77 de	47.10 $\pm$ 1.17 e	39.58 $\pm$ 0.90 bcde	8448.88 $\pm$ 21.87 g
		180	491.34 $\pm$ 6.78 c	47.40 $\pm$ 1.62 de	39.31 $\pm$ 0.59 cde	9115.57 $\pm$ 26.01 b
		240	515.19 $\pm$ 8.74 a	48.07 $\pm$ 1.08 cde	37.18 $\pm$ 0.75 f	9184.94 $\pm$ 32.09 ab
山农 15 S15	D60	0	488.03 $\pm$ 3.74 i	32.47 $\pm$ 1.36 ab	50.99 $\pm$ 1.00 a	7869.52 $\pm$ 47.59 i
		180	501.03 $\pm$ 4.08 j	33.10 $\pm$ 0.84 ab	50.89 $\pm$ 0.92 ab	8268.33 $\pm$ 22.47 g
		240	512.04 $\pm$ 4.74 i	33.55 $\pm$ 1.33 a	50.10 $\pm$ 0.81 ab	8387.39 $\pm$ 34.55 f
	D75	0	557.03 $\pm$ 9.59 h	31.73 $\pm$ 1.12 bc	49.23 $\pm$ 1.08 b	8523.58 $\pm$ 28.31 de
		180	586.53 $\pm$ 8.67 g	31.90 $\pm$ 0.83 abc	49.22 $\pm$ 0.80 b	9190.30 $\pm$ 36.9 ab
		240	610.53 $\pm$ 9.10 f	32.35 $\pm$ 1.02 ab	47.43 $\pm$ 1.03 c	9243.09 $\pm$ 26.96 a
	D90	0	623.37 $\pm$ 7.87 e	29.50 $\pm$ 1.04 def	46.33 $\pm$ 0.88 cd	8425.07 $\pm$ 31.50 f
		180	657.69 $\pm$ 6.47 c	30.40 $\pm$ 0.71 cde	45.36 $\pm$ 0.97 de	9063.06 $\pm$ 47.50 c
		240	688.04 $\pm$ 7.56 a	30.63 $\pm$ 0.35 cd	44.27 $\pm$ 0.59 ef	9126.55 $\pm$ 37.00 b
	D105	0	640.37 $\pm$ 8.93 d	28.13 $\pm$ 1.28 f	44.36 $\pm$ 0.97 ef	7962.49 $\pm$ 22.55 h
		180	671.54 $\pm$ 5.72 b	28.83 $\pm$ 1.48 ef	44.05 $\pm$ 0.85 ef	8480.14 $\pm$ 20.61 e
		240	692.87 $\pm$ 8.78 a	28.90 $\pm$ 0.83 ef	43.13 $\pm$ 0.90 f	8574.31 $\pm$ 33.00 d

注(Note): 同一品种中的同一列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column within a cultivar mean significant at 5% level.

2.2 氮肥与密度互作对氮素利用效率的影响

由表 2 看出,施氮量相同条件下,种植密度提高显著增加单位面积上植株氮的积累量,两个品种的氮积累量最大值均出现在 D105、N240 处理,T18 和 T15 分别为 328.98 kg/hm² 和 352.26 kg/hm²。随种植密度提高,氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力以及氮素养分利用效率呈现先增加后降低的趋势,其中大穗型品种泰农 18 的种植密度为 90 kg/hm²、中穗型品种山农 15 为 75 kg/hm² 的条件

下,上述指标达到最大值。氮肥吸收利用率分别为 37.69% 和 38.54%,偏生产力分别为 51.35 kg/kg 和 51.06 kg/kg。种植密度相同条件下,增施氮肥显著提高了单位面积植株中氮素积累量,但显著降低了氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率和氮肥偏生产力等指标,但两个施用氮肥水平间氮素养分利用效率无显著差异。T18 在 D90、N180 处理,S15 在 D75、N180 处理,能够实现产量与氮素利用效率的同步改善。

表 2 不同处理对小麦氮素利用效率的影响
Table 2 Effect of different treatments on nitrogen utilization efficiency of wheat

品种 Cultivar	密度 Density	施氮量 N rate (kg/hm ²)	氮积累量 NAA (kg/hm ²)	氮素养分 利用效率 NUE (kg/kg)	氮肥农学 利用率 NAE (kg/kg)	氮肥吸收 利用率 NRE (%)	氮肥偏 生产力 NPFP (kg/kg)
泰农 18 T18	D60	0	240.69 ± 2.77 i	32.53 ± 0.53 b			
		180	294.54 ± 2.11 f	27.97 ± 0.88 de	2.28 ± 0.02 f	29.92 ± 0.77 e	45.78 ± 0.82 c
		240	305.66 ± 2.41 e	27.30 ± 0.56 e	2.15 ± 0.10 g	27.07 ± 0.73 g	34.77 ± 0.86 f
	D75	0	246.09 ± 3.23 h	32.95 ± 0.53 b			
		180	305.24 ± 3.39 e	28.35 ± 0.40 cd	3.03 ± 0.05 d	32.86 ± 0.52 c	48.08 ± 0.19 b
		240	313.70 ± 3.52 d	27.88 ± 0.49 de	2.66 ± 0.02 e	28.17 ± 0.49 f	36.44 ± 0.61 e
	D90	0	250.40 ± 4.11 h	34.05 ± 0.53 a			
		180	318.24 ± 2.04 cd	29.04 ± 0.57 c	3.98 ± 0.05 a	37.69 ± 0.60 a	51.35 ± 0.13 a
		240	325.78 ± 3.94 ab	28.53 ± 0.40 cd	3.19 ± 0.01 c	31.41 ± 0.74 d	38.72 ± 0.92 d
	D105	0	255.73 ± 3.57 g	33.04 ± 0.21 b			
		180	320.73 ± 3.28 bc	28.42 ± 0.17 cd	3.70 ± 0.02 b	36.11 ± 0.85 b	50.64 ± 0.74 a
		240	328.98 ± 4.39 a	27.92 ± 0.60 de	3.06 ± 0.06 d	30.52 ± 0.33 e	38.27 ± 0.91 d
山农 15 S15	D60	0	259.54 ± 2.52 i	30.32 ± 0.32 c			
		180	314.46 ± 3.11 f	26.29 ± 0.80 fg	2.22 ± 0.01 d	30.51 ± 0.28 d	45.94 ± 0.95 c
		240	324.22 ± 6.05 e	25.87 ± 0.65 g	2.16 ± 0.10 d	26.95 ± 0.76 e	34.95 ± 0.50 e
	D75	0	262.04 ± 2.69 i	32.53 ± 0.88 a			
		180	331.42 ± 5.67 d	27.73 ± 0.24 de	3.70 ± 0.02 a	38.54 ± 0.72 a	51.06 ± 0.34 a
		240	344.00 ± 4.76 bc	26.87 ± 0.65 f	3.00 ± 0.05 b	34.15 ± 0.34 c	38.51 ± 0.53 d
	D90	0	267.16 ± 5.07 h	31.54 ± 0.16 b			
		180	334.90 ± 3.87 d	27.06 ± 0.61 ef	3.54 ± 0.03 a	37.08 ± 0.87 b	50.35 ± 0.37 a
		240	347.32 ± 4.68 ab	26.28 ± 0.50 fg	2.92 ± 0.07 b	33.40 ± 0.25 c	38.03 ± 0.88 d
	D105	0	279.32 ± 2.86 g	28.51 ± 0.22 d			
		180	340.94 ± 4.12 c	24.87 ± 0.18 h	2.88 ± 0.09 b	33.68 ± 0.20 c	47.11 ± 0.70 b
		240	352.26 ± 3.51 a	24.34 ± 0.74 h	2.55 ± 0.03 c	30.39 ± 0.83 d	35.73 ± 0.75 e

注(Note): NAA—N accumulation amount; NUE—N utilization efficiency; NAE—N agronomic efficiency; NRE—N recovery efficiency; NPFP—N partial factor productivity. 同一品种中的同一列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column within a cultivar mean significant at 5% level.

2.3 子粒产量和干物质积累量与氮素利用效率相关指标间的相关分析

表3显示,氮肥农学利用效率、氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力以及氮素养分利用效率间呈现显著或极显著正相关,说明本试验中所涉及到的氮素效率指标受氮肥水平和种植密度影响呈现同向变化的趋势。同时还可以看出,氮素养分利用效率与氮积累量呈极显著负相关,氮肥农学利用效率、氮肥吸

收利用率与子粒产量呈显著或极显著正相关,子粒产量、氮积累量与干物质积累量呈极显著正相关而子粒产量与经济系数呈极显著负相关。表明受氮肥水平和种植密度影响,单位面积氮吸收量减少是氮素养分利用效率提高的主要原因,子粒产量提高引起氮肥农学利用效率和氮肥吸收利用率的协同提高,而子粒产量的提高主要归因于干物质积累量的增加。

表3 子粒产量和干物质积累量与氮素利用效率相关指标间的相关分析

Table 3 Correlation between grain yield, dry matter accumulation and parameters related to nitrogen use efficiency

项目 Item	GY		DMA		HI		NAA		NUE		NAE		NRE		NPFP	
	T18	S15	T18	S15	T18	S15	T18	S15	T18	S15	T18	S15	T18	S15	T18	S15
GY	1	1														
DMA	0.97**	0.68*	1	1												
HI	-0.81**	-0.17	-0.93**	-0.84**	1	1										
NAA	0.82**	0.68*	0.79**	0.79**	-0.66*	-0.55	1	1								
NUE	-0.51	-0.28	-0.49	-0.60*	0.41	0.58*	-0.91**	-0.90**	1	1						
NAE	0.85**	0.82**	0.70**	0.51	-0.40	-0.08	0.64*	0.29	0.88**	0.61*	1	1				
NRE	0.61*	0.77**	0.41	0.44	-0.09	-0.04	0.33	0.21	0.90**	0.63*	0.93**	0.97**	1	1		
NPFP	0.20	0.20	-0.02	-0.05	0.31	0.18	-0.11	-0.35	0.74**	0.50	0.66*	0.66*	0.88**	0.75**	1	1

注(Note): GY—子粒产量 Grain yield; DMA—干物质积累量 Dry matter accumulation; HI—经济系数 Harvest index; NAA—氮积累量 N accumulation amount; NUE—氮素养分利用效率 N utilization efficiency; NAE—氮肥农学利用率 N agronomic efficiency; NRE—氮肥吸收利用率 N recovery efficiency; NPFP—氮肥偏生产力 N partial factor productivity. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

2.4 氮肥与密度的产量效应曲线

为了更好地分析氮密互作效应,获得施氮量和密度的最佳平衡点,根据表1中的产量结果,将T18和S15的子粒产量与施氮量(N)和密度(D)的关系进行分析,建立数学关系,得出施氮量和播量与产量效应呈二元二次双曲面方程:

$$Y_{T18} = 3541.301 + 2.63982N + 101.6377D + 0.02488ND - 0.00802N^2 - 0.52179D^2, R^2 = 0.9607^{**};$$
$$Y_{S15} = -1652.924 + 3.67277N + 247.581D + 0.00844ND - 0.00713N^2 - 1.49239D^2, R^2 = 0.9748^{*}.$$

经显著性检验两方程与实际情况拟合较好,并且具有一定的代表性。从两个方程的回归系数分析,方程中密度(D)的一次项系数和二次项系数均达到极显著水平,其余各项系数均不显著。表明密度是两个品种产量变化的主导因素;且只有在适宜的密度下合理地施用氮肥才能有效地利用氮密互作效应,提高产量。

为分析某一施氮水平下密度的产量效应,分别在3个施氮水平下,求得了相应密度(D)的单因子产量(Y)效应方程,之后对密度(D)进行求导,获得最高产量结果以及获得该产量时的密度。

密度的产量效应方程(表4)显示,两个品种无论哪种施氮水平,播量都与产量呈抛物线关系,且存在极大值。播量较低时,两个品种的产量都随播量的增加而增加;但当播量增加到一定程度后,产量开始下降。在施N180和240 kg/hm²时,大穗型品种T18获得最高产量的种植密度分别为101.68和103.12 kg/hm²;中穗型品种S15获得最高产量的种植密度分别为83.46和83.63 kg/hm²。可见,T18的播量为102 kg/hm²左右,而S15播量为83 kg/hm²左右是适宜的。

3 讨论

研究表明,适当增加密度有利于产量的提高,再继续增加密度产量会降低。刘萍等^[10]报道,弱筋品种扬麦9号播种密度从105×10⁴/hm²增至240×10⁴/hm²时,产量上升,播种密度再增加则呈相反趋势;中筋品种扬麦12号播种密度从105×10⁴/hm²增至150×10⁴/hm²时,产量上升,播种密度再增加亦呈相反趋势。本试验也表明,播量与产量呈抛物线关系,大穗型品种泰农18的适宜播量在102 kg/hm²左右,而中穗型品种山农15的适宜播量在83 kg/hm²左右,播量过高或过低时,产量出现下降的趋势。

表 4 不同氮素的播量效应方程及最高产量

Table 4 Effect equation of different nitrogen rates and seeding densities, and maximum yield

品种 Cultivar	施氮量 N rate (kg/hm ²)	播量(D)的产量(Y)效应方程 Effect equation of seeding density	最高产量(kg/hm ²)(相应密度, kg/hm ²) Max. yield(The corresponding density)
泰农 18 T18	0	$Y = 3541.301 + 101.6377D - 0.52179D^2$	8490.27(97.39)
	180	$Y = 3756.62 + 106.1161D - 0.52179D^2$	9169.74(101.68)
	240	$Y = 3712.906 + 107.6089D - 0.52179D^2$	9279.80(103.12)
山农 15 S15	0	$Y = -1652.924 + 247.581D - 1.49239D^2$	8615.23(82.95)
	180	$Y = -1222.84 + 249.1002D - 1.49239D^2$	9171.71(83.46)
	240	$Y = -1182.15 + 249.6066D - 1.49239D^2$	9254.71(83.63)

大多研究认为,施氮量与子粒产量呈抛物线关系,当施氮量超过临界值时,投入产出率急剧下降,符合报酬递减原理。在不同的土壤肥力、品种等生产条件下进行的研究表明,小麦施氮量的最高上限为 N 150 ~ 225 kg/hm²^[26-29];冯福生等^[29]认为,施氮量超过 N180 kg/hm²,叶片蛋白质和叶绿素含量均下降,产量呈降低的趋势;张显等^[26]指出,施氮量超过 N 225 kg/hm²时,小麦生育后期的群体光合速率为高值速降型,产量也会下降。本试验中,各处理的产量都随着施氮量的增加而提高,但两个小麦品种在最适宜密度下,即泰农 18 在播量为 102 kg/hm²,山农 15 在播量为 83 kg/hm²的处理下,施 N180 kg/hm²处理取得了与施 N 240 kg/hm²处理相当的产量结果,同时显著提高了氮素利用效率。因此,考虑到小麦的最佳效益,在该密度下采用施氮量为 N 180 kg/hm²的处理最合理。施氮量由 N180 kg/hm²增加到 N 240 kg/hm²时,施氮效应仍表现为正效应,没有表现为减产。由于两个施氮量相差较大,二者之间是否存在一个产量最高的施氮量,有待进一步研究。

在小麦生产中,氮肥利用率是衡量施氮是否合适的一个重要指标。早在 80 年代初,Austin^[30]就指出,随着小麦产量的不断提高,氮素吸收与利用问题将日益突出。许多研究认为,随施氮量增加冬小麦氮肥利用率递减,相应其损失量显著增加;不同小麦品种对氮素的吸收利用存在差异,针对不同品种应采取与其特性相适应的栽培措施,合理运筹氮素,才能发挥品种的遗传潜力,达到高产优质^[31]。已有研究表明,在一定阈值范围内,植株氮素吸收总量与施氮量呈正相关^[32-33]。本试验中,高密度和高施氮处理下,植株虽然吸收了较高量的氮素,但氮素利用效率反而较低,不利于氮素的有效利用。适宜的密

度处理能够显著地提高氮素利用效率,而无论何种密度下,降低施氮量的处理氮素利用效率均显著提高。本研究指出,施 N 180 kg/hm²的处理虽然施氮效应低于 N 240 kg/hm²的处理,但密度效应和互作效应却显著优于 N 240 kg/hm²的处理,使得施氮效应、密度效应以及二者的互作效应表现为协同作用,使氮素利用效率得到了有效提高。

氮肥和密度的增产作用不仅在于两者本身,还在于两者间的交互效应。只有密度和氮肥统筹兼顾,才能保证小麦的高产高效。本研究结果表明,氮肥和密度在一定范围内是可以相互促进的,因此,生产上可通过氮密互作的途径,在适宜的播量和施氮量下,有效地利用氮肥和密度的交互效应来提高产量并同步提高氮素利用效率。综合考虑氮肥和密度的互作效应、产量、氮素利用效率等因素,本试验条件下,大穗型品种泰农 18 播量为 102 kg/hm²左右,施氮量为 N 180 kg/hm²,中穗型品种山农 15 播量为 83 kg/hm²左右,施氮量为 N 180 kg/hm²较为适宜。

参考文献:

- [1] 朱德群,朱遐龄. 与冬小麦有关的籽粒蛋白质有关的几项生理参数[J]. 作物学报,1991,17(2): 135-144.
Zhu D Q, Zhu X L. Several physiological parameters in relation to grain protein content in winter wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Acta Agron. Sin., 1991, 17 (2): 135-144.
- [2] Deckard E L. Nitrate reductase assays as a prediction test for crosses and lines in spring wheat [J]. Crop Sci., 1978, 18: 289-294.
- [3] Peltonen J, Virtanen A. Effects of nitrogen fertilizers differing in release characteristics on the quantity of storage proteins in wheat [J]. Cereal Chem., 1994, 71: 1-5.
- [4] Arvind K S, Jagdish K L, Singh V K *et al.* Calibrating the leaf color chart for nitrogen management in different genotypes of rice and wheat in a system perspective [J]. Agron J., 2004, 96:

- 1606–1621.
- [5] Raun W R, Johnson V G. Improving nitrogen use efficiency for cereal production [J]. *Agron. J.*, 1999, 91: 357–363.
 - [6] Zhang F S, Mi G H, Liu J A. The improvement and application of maize in N efficiency [J]. *J. Agric. Biotech.*, 1997, 2: 112–117.
 - [7] Jaime L, Antonio L, Javier F *et al.* Bread-making wheat and soil nitrate as affected by nitrogen fertilization in irrigated Mediterranean condition [J]. *Agron. J.*, 2001, 93: 1183–1190.
 - [8] Dana L D, Douglas L K, Dan B J *et al.* Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained mid-western soils [J]. *Agron. J.*, 2002, 94: 153–171.
 - [9] Yang S M, Li F M, Sukhdev S M *et al.* Long-term fertilization effects on crop yield and nitrate nitrogen accumulation in soil in northwestern China [J]. *Agron. J.*, 2004, 96: 1039–1049.
 - [10] 刘萍,郭文善,徐月明,等. 种植密度对中、弱筋小麦子粒产量品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(5): 117–121.
Liu P, Guo W S, Xu Y M *et al.* Effect of planting density on grain yield and quality of weak-gluten and medium-gluten wheat [J]. *J. Trit. Crops*, 2006, 26(5): 117–121.
 - [11] 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.
 - [12] 王萍,陶丹,宋海星,等. 品种、播期和密度对冬小麦生育期和产量的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 1999, 30(6): 602–605.
Wang P, Tao D, Song H X *et al.* Effect of varieties, sowing stages and densities on growth period and yield of winter wheat [J]. *J. Shenyang Agric Univ.*, 1999, 30(6): 602–605.
 - [13] 荆奇,曹卫星,戴廷波. 小麦子粒品质形成及其调控研究进展[J]. *麦类作物学报*, 2003, 19(4): 46–50.
Jing Q, Cao W X, Dai T B. Wheat grain quality and regulation [J]. *J. Trit. Crops*, 2003, 19(4): 46–50.
 - [14] 徐阳春,蒋廷惠,张春兰,等. 不同面包小麦品种的产量及蛋白质含量对氮肥用量的反应[J]. *作物学报*, 1998, 24(6): 731–737.
Xu Y C, Jiang T H, Zhang C L *et al.* Responses of grain yield and protein content of bread-making wheat cultivars to nitrogen application rate [J]. *Acta Agron. Sin.*, 1998, 24(6): 731–737.
 - [15] 潘庆民,于振文,王月福,等. 公顷产 9000 kg 小麦氮素吸收分配的研究[J]. *作物学报*, 1999, 25(5): 541–547.
Pan Q M, Yu Z W, Wang Y F *et al.* Studies on uptake and distribution of nitrogen in wheat at the level of 9000 kg per hectare [J]. *Acta Agron. Sin.*, 1999, 25(5): 541–547.
 - [16] 林琪,侯立白,韩伟. 不同肥力土壤下施氮量对小麦籽粒产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 561–567.
Lin Q, Hou L B, Han W. Effects of nitrogen rates on grain yield and quality of wheat in different soil fertility [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2004, 10(6): 561–567.
 - [17] O'Sullivan J, Gabelman W H, Gerloff G G. Variation's efficiency of nitrogen utilization in tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill) growth under nitrogen stress [J]. *J. Am. Soc. for Horticult. Sci.*, 1974, 99: 543–547.
 - [18] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production [J]. *Plant Soil*, 1981, 58: 177–204.
 - [19] 刘学军,赵紫娟,巨晓棠,等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. *生态学报*, 2002, 33(7): 1122–1128.
Liu X J, Zhao Z J, Ju X T *et al.* Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2002, 33(7): 1122–1128.
 - [20] 霍中洋,葛鑫,张洪成,等. 施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. *作物学报*, 2004, 30(5): 449–454.
Huo Z Y, Ge X, Zhang H C *et al.* Effect of different nitrogen application types on N-absorption and N-utilization rate of specific use cultivars of wheat [J]. *Acta Agron. Sin.*, 2004, 30(5): 449–454.
 - [21] 巨晓棠,潘家荣,刘学军,等. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 264–270.
Ju X T, Pan J R, Liu X J *et al.* Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat/summer maize rotation system in Beijing suburban [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2003, 9(3): 264–270.
 - [22] Moll R H. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization [J]. *Agron. J.*, 1982, 74: 562–564.
 - [23] 何照范. 粮油子粒品质及其分析技术[M]. 北京: 农业出版社, 1985. 31–41, 57–59.
He Z F. Analysis technique for grain quality of cereals and oils [M]. Beijing: Agricultural Press, 1985. 31–41, 57–59.
 - [24] 陈子元,温贤芳,胡国辉. 核技术及其在农业科学中的应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 1983. 466–484.
Chen Z Y, Wen X F, Hu G H. Nuclear technology and its use in agriculture science [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1983. 466–484.
 - [25] 刘立军,桑大志,刘翠莲,等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(12): 1456–1461.
Liu L J, Sang D Z, Liu C L *et al.* Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2003, 36(12): 1456–1461.
 - [26] 张显,钱维朴. 不同施 N 水平小麦冠层光合特性[A]. 中国园艺学会. 第一届全国青年作物栽培作物生理学术会文集[C]. 北京: 科学技术出版, 1993. 58–60.
Zhang X, Qian W P. Study on the relationship between canopy photosynthetic characteristics and yield formation in different N level in wheat [A]. Chinese Society for Horticultural Science. Proceeding of 1st national youth symposium on crop culture and

- physiology [C]. Beijing: China Science and Technology Press, 1993, 58–60.
- [27] 彭永欣, 姜雪忠, 郭文善, 等. 小麦栽培与生理 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1992. 145–158.
- Peng Y X, Jiang X Z, Guo W S *et al.* Cultivation techniques and physiology of wheat [M]. Nanjing: Southeast University Press. 1992. 145–158.
- [28] 位东斌, 林琪, 王志良, 等. 中后期追氮对小麦叶片氮含量及子粒产量、蛋白质含量的影响 [J]. 河南职业技术学院学报, 1990, 18(3): 97–101.
- Wei D B, Lin Q, Wang Z L *et al.* Influences of additional nitrogen fertilizer in the middle and late period of wheat growth on leaf nitrogen content, grain yield and grain protein content [J]. J. Henan Voc. Tech. Teach. Coll., 1990, 18(3): 97–101.
- [29] 冯福生, 陈文龙, 李洁, 等. 不同供氮水平下冬小麦叶片中 RuBP 羧化酶和硝酸还原酶的活性变化 [J]. 植物生理学通讯, 1986, (6): 20–22.
- Feng F S, Chen W L, Li J *et al.* Variation of the activities of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase and nitrate reductase in leaves from wheat plant grown different nitrogen levels [J]. Plant Physiol. Comm., 1986 (6): 20–22.
- [30] Austin R B. Physiological limitations to cereal yields and ways of reducing them by breeding [A]. Hurd R G. Opportunities for increasing crop yield [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. 3–19.
- [31] 杨延兵, 高荣岐, 尹燕桦, 等. 氮素与品种对小麦产量和品质性状的效应 [J]. 麦类作物学报, 2005, 25(6): 67–70.
- Yang Y B, Gao R Q, Yin Y P *et al.* Effects of nitrogen and variety on yield and quality traits of winter wheat [J]. J. Trit. Crops, 2005, 25 (6): 67–70.
- [32] 陆成彬, 张伯桥, 高德荣, 等. 施氮量与追肥时期对弱筋小麦扬麦 9 号产量和品质的影响 [J]. 扬州大学学报, 2006, 27(3): 62–64.
- Lu C B, Zhang B Q, Gao D R *et al.* Effect of nitrogen application rate and topdressing stage on grain yield and quality of weak-gluten wheat [J]. J. Yangzhou Univ., 2006, 27(3): 62–64.
- [33] Lloveras J, Lopez A, Ferran J *et al.* Bread-making wheat and soil nitrate as affected by nitrogen fertilization in irrigated Mediterranean conditions [J]. Agron. J., 2001, 93: 1183–1190.