

种植密度对冬小麦氮素吸收利用和分配的影响*

王树丽 贺明荣** 代兴龙 周晓虎

(山东农业大学农学院 作物生物学国家重点实验室 泰安 271018)

摘要 为了探讨实现冬小麦籽粒产量与氮素利用效率协同提高的途径,为制定高产、高效栽培管理措施提供理论依据,在大田条件下,以大穗型小麦品种“泰农 18”和中穗型小麦品种“山农 15”为试验材料,根据品种特性分别设置4个种植密度(“泰农 18”: 135 万苗·hm⁻²、270 万苗·hm⁻²、405 万苗·hm⁻²和 540 万苗·hm⁻²;“山农 15”: 172.5 万苗·hm⁻²、345 万苗·hm⁻²、517.5 万苗·hm⁻²和 690 万苗·hm⁻²),研究了种植密度对籽粒产量、氮素吸收积累和运转分配、氮素利用效率以及土壤中硝态氮、铵态氮和无机态氮总积累量的影响。研究表明,随种植密度增加,两种穗型冬小麦品种成熟期植株氮素积累量、籽粒产量、氮肥吸收利用效率和氮肥偏生产力均表现为先增加后降低,籽粒氮积累量、氮素收获指数和籽粒氮含量下降,花前营养器官氮素转运量和对籽粒氮的贡献率升高。随种植密度的增加,“泰农 18”的氮素利用效率随密度的增大先增大后减小,“山农 15”随密度的增大而减小。土壤中硝态氮、铵态氮和无机态氮总积累量随密度增加而降低。在本试验条件下,“泰农 18”和“山农 15”兼顾高产和高效利用氮素的适宜种植密度分别为 270 万苗·hm⁻²和 345 万苗·hm⁻²。

关键词 冬小麦 穗型 种植密度 氮素吸收 分配利用 产量

中图分类号: S512 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2012)10-1276-06

Effect of planting density on nitrogen uptake, utilization and distribution in winter wheat

WANG Shu-Li, HE Ming-Rong, DAI Xing-Long, ZHOU Xiao-Hu

(College of Agronomy, Shandong Agricultural University; National Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an 271018, China)

Abstract Intensive wheat cultivation requires large inputs of nitrogen (N) fertilizer. However, only a limited proportion of the applied N is taken up by winter wheat, meaning that large amounts of N are lost to the environment. This loss of N fertilizer represents not only a considerable cost to the grower, but may also to the environment. Therefore, there has been increasing global emphasis on optimized management strategies for high nitrogen use efficiency (NUE; i.e., grain yield/available N) to help reduce excessive N fertilizer inputs while maintaining acceptable grain yields. The amount and spatial distribution of plant roots in soil profile reflect potential nutrient up-take. Also plant density can influence root distribution in soil profile, increasing seminal roots per unit area and reducing nodal roots per culm. Various planting densities were therefore considered in relation to high NUE. The aim of the study was to find suitable wheat planting density that simultaneously produced high grain yields and NUE. To that end, two winter wheat cultivars (large-spike “Tainong 18” and medium-spike “Shannong 15”) were selected and experimented under field conditions at various planting densities. The planting densities were 1.35 million·hm⁻², 2.70 million·hm⁻², 4.05 million·hm⁻² and 5.40 million·hm⁻² for “Tainong 18”; and 1.725 million·hm⁻², 3.45 million·hm⁻², 5.175 million·hm⁻² and 6.90 million·hm⁻² for “Shannong 15”. The two wheat cultivars were analyzed for the uptake, distribution and utilization of N, and for grain yield and inorganic N accumulation in soil profile. The results showed that N accumulation at maturity, grain yield, N uptake efficiency and N partial factor productivity were highest under the planting densities of 2.70 million·hm⁻² for “Tainong 18” and 3.45 million·hm⁻² for “Shannong 15”. Grain N accumulation at maturity, grain N after anthesis and N translocation to grain after anthesis reduced with increasing planting density. Translocated N amount, proportion and contribution to grain from stored N in vegetative organs before anthesis increased with increasing planting density. N harvest index, grain N concentration, and NO₃⁻-N, NH₄⁺-N and inorganic N

* 粮食丰产科技工程(2011BAD16B09)资助

** 通讯作者: 贺明荣(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为小麦栽培生理生态。E-mail: mrhe@sdau.edu.cn

王树丽(1986—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为小麦栽培生理。E-mail: wangshulihui@163.com

收稿日期: 2012-03-26 接受日期: 2012-05-31

accumulation at different depths of the soil profile decreased at wheat maturity with increasing planting density. In conclusion, grain yield and NUE were highest under planting densities of 2.70 million·hm⁻² for “Tainong 18” and 3.45 million·hm⁻² for “Shannong 15”. The recommended planting densities were therefore 2.70 million·hm⁻² for “Tainong 18” and 3.45 million·hm⁻² for “Shannong 15”.

Key words Winter wheat, Spike type, Planting density, Nitrogen uptake, Nitrogen distribution and utilization, Wheat grain yield (Received Mar. 26, 2012; accepted May 31, 2012)

合理密植是获得小麦高产的中心环节。氮代谢是植株体内最基本的物质代谢之一, 对小麦的产量和品质有重要影响^[1]。提高种植密度, 减少氮肥用量, 既可通过大幅度增加有效穗数来实现高产, 又能显著提高氮素利用率。在资源日益短缺、生产成本渐高及面源污染越来越严重的形势下, 密植少氮应是值得推广的栽培技术^[2]。Wang 等^[3]的研究亦指出, 较高的籽粒产量来自于较高的氮素利用效率和氮素再分配效率。种植密度的改变会造成小麦温光等生态条件的差异, 最终影响到籽粒蛋白质含量与产量^[4-7]。杨永光等^[8]的研究表明, 播量对籽粒产量的作用远大于对籽粒品质的作用。小麦产量和品质的形成既受开花前贮存碳、氮物质的调节, 又决定于开花后光合生产和氮素吸收能力^[9-11]。小麦籽粒氮素主要来自开花前营养器官贮存氮素的再分配, 约占籽粒氮素的 53.0%~80.8%^[12]。种植密度对冬小麦群体结构和产量的形成有显著调控效应^[13-14], 因此研究种植密度对冬小麦品种产量和氮肥利用效率的影响, 对于实现小麦的高效、高产和稳产具有重要意义。

关于种植密度对小麦生长发育及其产量的影响, 前人已做了许多研究。丛新军等^[15]研究表明, 如果基本苗少于 120 万·hm⁻², 则会因群体不足使花前干物质积累不足, 影响花后干物质积累, 最终导致减产。而郭伟等^[16]提出, 适当稀植可使个体生长充分, 花期以前营养体中的光合产物积累较多, 同时后期营养体中的物质可以较快地向籽粒运转, 使得在中低密度下的个体形成较大千粒重, 实现优质高产。然而, 目前以种植密度为调控手段对氮素同化、分配及氮素利用率影响的系统研究还鲜见报道。本试验通过研究密度对小麦氮素吸收分配和利用的影响, 以确立冬小麦氮素吸收和分配与种植密度调控的关系指标, 探明产量和氮素资源利用效率同步提高的最佳种植密度, 从而在实现高产的同时高效利用氮素。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2010—2011 年度在山东农业大学试验农场进行。试验用地为棕壤土, 播种前 0~20 cm 土层土壤含有机质 12.12 g·kg⁻¹, 全氮 0.87 g·kg⁻¹, 无机态氮 62.92 kg·hm⁻², 速效磷 31.9 mg·kg⁻¹, 速效钾 85 mg·kg⁻¹。

采取裂区设计, 主区设置两个小麦品种分别为大穗型“泰农 18”和中穗型“山农 15”, 裂区根据品种特性设置 4 个种植密度, “泰农 18”分别为 135 万苗·hm⁻²(T1)、270 万苗·hm⁻²(T2)、405 万苗·hm⁻²(T3) 和 540 万苗·hm⁻²(T4), “山农 15”分别为 172.5 万苗·hm⁻²(S1)、345 万苗·hm⁻²(S2)、517.5 万苗·hm⁻²(S3) 和 690 万苗·hm⁻²(S4), 每个处理 3 次重复, 小区面积 37.5 m²(25 m×1.5 m)。

试验于 2010 年 10 月 7 日播种。前茬玉米秸秆全部于播种前翻压还田。氮肥(尿素, 含 N 460 g·kg⁻¹)用量 240 kg(N)·hm⁻², 分别于播前和拔节期按 1:1 施用; 磷肥(磷酸二铵, 含 P₂O₅ 460 g·kg⁻¹)120 kg·hm⁻²、钾肥(KCl, 含 K₂O 600 g·kg⁻¹)120 kg·hm⁻², 基肥一次施入。底肥于播种前均匀撒施于各小区后耕翻, 拔节期开沟施肥, 其余管理措施同高产田。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 籽粒产量的测定

成熟期收获, 测产采用小区计产的方法, 每个小区收获 3 m², 重复 3 次, 脱粒晒干后测定产量并进行室内考种。

1.2.2 植株氮含量的测定

在开花期, 各处理均选择开花时间一致、穗型与茎高相近的 100 个单茎挂牌标记。在开花期、成熟期每个处理分别取 30 个单茎, 按叶、茎鞘、穗轴(含颖壳)、籽粒分样, 105 °C 下杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重, 称取干重, 粉碎机粉碎, 测定各器官全氮含量。用浓 H₂SO₄ 和催化剂(CuSO₄·5H₂O : K₂SO₄=1:5)消煮, 半微量凯氏定氮法测定氮含量。

1.2.3 土壤硝态氮的测定

于播种前和成熟期用土钻从地表开始每 20 cm 为 1 个土层取土, 取至 2 m 深。取样后放于冰箱内保存备测。样品解冻后, 称取 12 g 鲜土, 置于 120 mL 三角瓶内, 加入 1 mol·L⁻¹ 的 KCl 50 mL, 振荡 30 min 提取, 采用流动分析仪(AutoAnalyzer3, 德国)测定硝态氮和氨态氮, 同时测定含水量。

1.2.4 计算方法

$$\text{营养器官花前贮藏氮素转运量} = \text{开花期全氮量} - \text{成熟期全氮量} \quad (1)$$

$$\text{花后氮素积累量} = \text{成熟期籽粒全氮量} - \text{开花前营养器官贮藏氮素转运量} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{对籽粒氮贡献率} &= \text{开花前贮藏氮素转运量} \\ & (\text{或花后同化氮素量}) / \text{成熟期籽粒全氮量} \times 100\% \quad (3) \\ \text{植株总的氮素积累量} & (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{成熟期单株干重} \times \\ & \text{成熟期单株含氮量} \times \text{密度} \quad (4) \\ \text{氮收获指数} &= \text{籽粒氮量} / \text{地上部总氮量} \quad (5) \\ \text{氮肥吸收效率} &= \text{地上部总氮量} / (\text{土壤当季供氮量} + \\ & \text{化肥施用量}) \times 100\% \quad (6) \\ \text{氮素利用效率} & (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{籽粒产量} / \\ & \text{植株氮素积累量} \quad (7) \\ \text{氮肥偏生产力} & (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{施氮区产量} / \text{施氮量} \quad (8) \end{aligned}$$

1.3 数据处理与分析

试验数据采用 DPS 7.05 版数据处理系统分析, 用 LSD 法进行显著性测验。

2 结果与分析

2.1 种植密度对小麦植株氮素吸收积累的影响

由表 1 可以看出, 种植密度对不同生育阶段小麦植株氮素吸收积累的影响存在差异。拔节期前,

两个品种的氮素阶段积累量以及占整个生育期的比例均随种植密度增加而提高, 且不同处理间差异均达显著水平; “泰农 18”密度为 540 万苗·hm⁻²、“山农 15”为 690 万苗·hm⁻² 时的氮素积累量和所占比例最高。拔节至开花期, 氮素吸收积累量以及占整个生育期的比例, “泰农 18”以密度 270 万苗·hm⁻² 处理最高, “山农 15”则以 345 万苗·hm⁻² 处理最高, 过低或过高的种植密度都不利于本阶段氮素的吸收积累。而开花至成熟期的氮素吸收积累量以及占整个生育期的比例均随种植密度提高而降低。两个品种成熟期的氮素积累量随种植密度增加, 表现为先增加后降低的趋势, 当种植密度分别为 270 万苗·hm⁻² 和 345 万苗·hm⁻² 时, “泰农 18”和“山农 15”的氮素积累量最高。说明在本试验条件下, 适当增加密度, 能够显著增加植株对氮素的吸收积累, 过高密度反而降低植株对氮素的吸收积累。

2.2 种植密度对小麦植株氮素运转分配的影响

如表 2 所示, 两个冬小麦品种的籽粒氮积累量,

表 1 不同种植密度下不同生育阶段小麦植株的氮素积累量

Table 1 Nitrogen accumulation amount under different planting densities in wheat plant during different growth periods

品种 Variety	种植密度 Plant density (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	出苗—拔节 Emerging—jointing		拔节—开花 Jointing—anthesis		开花—成熟 Anthesis—maturity		成熟期 Maturity	
		积累量	积累比例	积累量	积累比例	积累量	积累比例	积累量	积累比例
		NAA (kg·hm ⁻²)	PNA (%)	NAA (kg·hm ⁻²)	PNA (%)	NAA (kg·hm ⁻²)	PNA (%)	NAA (kg·hm ⁻²)	PNA (%)
泰农 18	135	108.56±3.94d	36.84±1.62	95.32±1.00c	32.34±0.09	90.80±5.20a	30.80±1.53	294.68±2.26d	100
Tainong 18	270	132.12±5.22c	40.06±0.58	108.56±1.70a	32.95±1.34	89.01±4.75a	26.99±0.76	329.69±8.27a	100
	405	140.14±2.66b	43.62±1.89	100.36±4.71b	31.20±0.71	81.01±5.75b	25.18±1.18	321.51±7.80b	100
	540	150.20±0.94a	48.19±0.94	92.63±1.37c	29.70±0.05	68.94±3.71c	22.10±0.90	311.83±4.14c	100
山农 15	172.5	111.95±4.25d	38.49±1.97	90.56±4.91d	31.11±1.27	88.46±3.20a	30.39±0.70	290.97±3.86d	100
Shannong 15	345	130.12±4.48c	38.78±0.88	119.16±1.43a	35.52±0.02	86.22±1.66a	25.70±0.89	335.50±4.25a	100
	517.5	141.07±5.47b	43.88±0.06	100.93±1.71b	31.39±0.73	79.51±5.25b	24.73±0.67	321.51±12.43b	100
	690	151.28±8.02a	49.97±2.65	96.87±5.61c	32.00±1.85	54.57±2.44c	18.02±0.80	302.72±0.03c	100

表中数据为 3 个重复的平均值。同列同一品种数据后的不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著, 下同。Data in the table are means of three replicates. In each cultivar, values followed by different small letters in same column are significantly different at 0.05 probability level. The same below. NAA: amount of nitrogen accumulation; PNA: proportion of nitrogen accumulation.

表 2 不同种植密度对小麦花前氮素转运和花后氮素吸收积累的影响

Table 2 Effects of different planting densities on translocation of nitrogen stored before anthesis and accumulation of nitrogen as-similated after anthesis in wheat

品种 Variety	种植密度 Planting density (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	成熟期籽粒氮积累量 Accumulation of nitrogen in grain at maturity (kg·hm ⁻²)	来自花前营养器官中贮藏氮素再转运 From remobilization of nitrogen stored in vegetative organs before anthesis			来自花后吸收氮素 From uptake of nitrogen after anthesis	
			转运量	转运率	贡献率	转运量	贡献率
			Translocation amount (mg·stem ⁻¹)	Translocation proportion (%)	Contribution (%)	Translocation amount (mg·stem ⁻¹)	Contribution (%)
泰农 18	135	241.12±9.36a	131.03±7.30c	69.6±1.40c	54.32±0.92d	110.08±2.06a	45.68±0.92a
Tainong 18	270	233.39±14.09b	145.04±10.20b	71.2±0.40b	62.12±0.62c	88.35±3.89b	37.88±0.62b
	405	221.76±10.10c	152.15±10.08b	71.9±1.10b	68.57±1.42b	69.60±0.07c	31.43±1.42c
	540	189.05±4.91d	163.29±11.33a	73.2±1.20a	86.31±3.75a	25.76±6.42d	13.69±3.75d
山农 15	172.5	241.05±7.79a	126.32±6.93c	68.5±0.70c	52.38±1.18d	114.73±0.87a	47.62±1.18a
Shannong 15	345	222.64±11.45b	136.20±9.10b	72.1±0.80b	61.14±0.94c	86.45±2.36b	38.86±0.94b
	517.5	213.13±0.37c	139.94±3.04b	72.9±1.40b	65.66±1.54b	73.19±3.41c	34.34±1.54c
	690	181.81±5.47d	150.86±6.04a	73.8±1.70a	82.96±0.83a	30.95±0.58d	17.04±0.83d

随种植密度的增加而降低, 且不同处理间差异均达显著水平。花前营养器官中储存氮素的转运量、转运率和对籽粒氮的贡献率均随种植密度增加而提高, 但成熟期籽粒中氮素来自花后吸收的量及其贡献率均随种植密度增加而降低。

“泰农 18”种植密度由 135 万苗·hm⁻² 增至 540 万苗·hm⁻², 其开花前营养器官氮素再转运对籽粒的贡献率由 54.32% 提高到 86.31%; “山农 15”种植密度由 172.5 万苗·hm⁻² 增至 690 万苗·hm⁻², 其开花前营养器官氮素再转运对籽粒的贡献率由 52.38% 提高到 82.96%。相应的花后吸收氮素的贡献率分别由 45.68% 降至 13.69% 和由 47.62% 降至 17.04%。

2.3 种植密度对籽粒产量与氮素利用率的影响

表 3 显示, 两种穗型冬小麦品种的氮素收获指数和籽粒含氮量随种植密度增加而降低。对“泰农

18”而言, 籽粒产量、氮肥吸收利用效率、氮肥偏生产力与氮素养分利用效率均表现为随种植密度的增加先升高后降低, 且均以种植密度为 270 万苗·hm⁻² 时最高。对“山农 15”而言, 籽粒产量、氮肥吸收利用效率、氮肥偏生产力也呈现随种植密度增加先升高后降低的趋势, 但均以种植密度为 345 万苗·hm⁻² 时最高。“山农 15”的氮素养分利用效率表现为随密度增大而减小, 以种植密度为 172.5 万苗·hm⁻² 时最高。

2.4 种植密度对成熟期土壤中无机氮积累量及其分布的影响

如表 4 所示, 随种植密度提高, 成熟期土壤中硝态氮、铵态氮以及无机态氮在不同土壤层次的积累量均表现为降低, 从而表明种植密度的提高增加了小麦植株对氮素的吸收, 导致土壤中残留氮素的降低, 这对降低氮素淋洗损失是有益的。

表 3 不同种植密度对小麦籽粒产量和氮素利用率的影响
Table 3 Effects of different planting densities on grain yield and nitrogen use efficiency of wheat

品种 Variety	种植密度 Plant density ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	产量 Grain yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氮素利用率 Nitrogen utilization efficiency ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮肥偏生产力 Nitrogen partial factor productivity ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮肥吸收效率 Nitrogen uptake efficiency (%)	氮素收获指数 Nitrogen harvest index (%)	籽粒含氮量 Content of nitrogen in grain (%)
泰农 18	135	8 254.62±104.76d	28.01±0.14c	34.39±0.44d	39.15±1.00d	81.81±2.55a	2.92±0.11a
Tainong 18	270	9 884.54±286.39a	29.98±1.62a	41.19±1.19a	43.80±1.65a	70.75±2.50b	2.36±0.23b
	405	9 268.99±127.35b	28.83±0.30b	38.62±0.53b	42.71±1.06b	68.95±1.47b	2.39±0.27b
	540	8 640.56±689.47c	27.71±1.84d	36.00±2.87c	41.43±0.17c	60.62±0.77c	2.18±0.17c
山农 15 Shannong 15	172.5	8 605.30±201.71c	29.57±0.30a	35.86±0.84c	38.65±0.40d	82.83±1.58a	2.80±0.05a
	345	9 181.45±307.13a	27.72±1.37b	38.26±1.28a	44.57±0.59a	68.26±0.81b	2.42±0.19b
	517.5	8 912.56±173.21b	27.66±1.56b	37.13±0.72b	42.71±0.45b	67.09±0.94b	2.40±0.32b
	690	8 330.70±354.90d	27.52±1.17c	34.71±1.48d	40.21±0.05c	60.06±1.80c	2.18±0.15c

表 4 不同种植密度对成熟期不同土层土壤无机态氮积累量的影响
Table 4 Effect of different planting densities on inorganic nitrogen accumulation in different depth of soil profile at maturity of wheat

品种 Variety	种植密度 Plant density ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	硝态氮积累量 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ accumulation ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		铵态氮积累量 $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ accumulation ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		无机态氮积累量 Inorganic nitrogen accumulation ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	
		0~100 cm	100~200 cm	0~100 cm	100~200 cm	0~100 cm	100~200 cm
泰农 18	135	210.9±5.3a	100.0±2.0a	70.3±2.3a	48.6±6.0ab	281.2±3.0a	148.6±4.0a
Tainong 18	270	188.8±16.2b	75.9±1.0b	62.0±7.0b	48.3±5.4b	250.8±9.2b	124.2±4.4b
	405	175.5±2.9c	68.1±2.8c	51.3±1.7c	48.9±3.3a	226.8±4.6c	117.0±6.1c
	540	167.1±5.9d	63.0±1.1c	47.3±2.1c	45.8±3.2c	214.4±8.0d	108.8±4.3d
山农 15 Shannong 15	172.5	209.0±22.8a	188.7±6.1a	60.4±1.3a	62.7±1.8a	269.4±24.1a	251.4±7.9a
	345	195.1±14.9b	165.0±6.0b	58.7±0.1b	47.6±0.9b	253.8±14.8b	212.6±4.1b
	517.5	193.2±0.9b	146.0±7.0c	55.9±0.2c	40.1±0.6c	249.1±0.7c	186.1±7.6c
	690	149.3±3.7c	138.7±0.1d	51.9±0.6d	39.7±0.6c	201.2±3.1d	178.4±0.7d

3 讨论和结论

Moll 等^[17]将氮效率分解为吸收效率和利用效率两个构成因素, 吸收效率是成熟期地上部积累的总氮量与土壤供应水平的比值; 利用效率是籽粒产量

与成熟期地上部积累的总氮量的比值或是氮素收获指数与成熟期籽粒氮含量的比值。实际上, 氮效率的提高可以通过提高植株地上部氮素积累量来提高氮素吸收效率或者通过提高成熟期氮素收获指数和降低成熟期籽粒氮含量来提高氮素利用效率。

Dhugga 等^[18]的研究表明, 氮素吸收效率和产量具有显著的遗传效应^[18]。童依平等^[19]的研究表明, 籽粒产量和生物量均与吸氮量之间呈显著或极显著正相关; 与利用效率的相关系数相对较差; 吸氮量是影响籽粒产量的主要因素。本试验条件下, “泰农 18”和“山农 15”成熟期氮素积累量最高的处理同时也是籽粒产量最高的处理, 这与童依平等的研究结果一致。于文明^[20]研究认为, 高密度不利于小麦植株的氮素积累, 过高密度下小麦开花后植株氮素积累量降低。本研究表明, 小麦植株对氮素的吸收积累量, 出苗至拔节期表现为随种植密度提高而增加, 拔节至开花期呈现出先增加后降低的趋势, 开花后则表现为随种植密度提高而降低, 成熟期随密度的增加而下降。结果显示“泰农 18”和“山农 15”成熟期氮素积累量最高的处理分别为 270 万苗·hm⁻² 和 345 万苗·hm⁻² 处理, 相应两处理的氮素吸收利用率也最高。这应该与适宜种植密度下, 单位面积上的总根量、根长密度和根系活力提高有关。成熟期土壤硝态氮残留量在不同种植密度间存在显著差异主要与品种的吸收效率有关, 吸氮量越高, 硝态氮残留量越低^[21], 本研究结果也证实了这一点。

Barraclough 等^[22]研究表明, 决定小麦氮素利用效率的 4 个关键因素是籽粒产量、籽粒含氮量、成熟期地上部植株氮素积累量和氮素收获指数, 通过提高籽粒产量和氮素收获指数来提高氮素利用效率在实际生产中很困难, 实际生产中主要通过降低籽粒的氮含量来提高氮肥的利用效率。Foulkes 等^[23]研究表明, 低籽粒氮含量能够提高单位吸收氮的光合潜力, 从而提高氮素利用效率。张国平等^[24]研究表明, 氮素收获指数与籽粒含氮量呈极显著正相关。本试验中, “泰农 18”和“山农 15”成熟期氮素收获指数和籽粒含氮量均随密度增加而降低, 从而表明, 本试验条件下氮素利用效率的提高主要得益于籽粒含氮量的降低。

Osaki 等^[25]研究认为, 营养体过量的氮素转移导致叶片早衰及光合能力下降。在密度条件下, 氮运转率较高, 动用了过多叶和茎中的氮, 削弱了营养器官的光合活性, 从而限制碳水化合物对茎和籽粒的供给, 最终影响产量和氮素利用率的提高。高密度条件下叶片较早衰老, 虽然碳运转率较高, 但如果仅仅是光合产物向籽粒分配比例增多, 而光合产物的绝对量并没有增加时, 也不会达到高籽粒产量和高氮利用率^[26]。而适宜的种植密度既可保持较高的叶面积, 又有利于糖分的转化, 从而提高了籽粒产量^[27]。在本试验中, 花前营养器官氮素转运

量、运转率和对籽粒氮的贡献率均随种植密度增加而提高, 会造成叶片氮素含量下降, 从而导致叶片的早衰和花后光合同化的氮素积累随密度增加而降低, 最终影响到籽粒产量和氮收获指数的提高。适宜种植密度既保持了花后营养体较高的氮素转运量, 又使氮运转率不至于过高, 避免生育后期叶片早衰, 为产量与氮素效率协同提高奠定了基础。同时籽粒含氮量也随密度增大而降低, 从而利于达到氮素利用效率和产量的协同提高。大穗型品种“泰农 18”在密度为 270 万苗·hm⁻² 和中穗型品种“山农 15”在密度为 345 万苗·hm⁻² 下生长发育良好, 能够兼顾高产的同时高效利用氮素。

因此, 综合考虑种植密度对氮素同化分配和产量的影响表明, 大穗型品种“泰农 18”种植密度为 270 万苗·hm⁻² 和中穗型品种“山农 15”种植密度为 345 万苗·hm⁻² 条件下能够实现产量和氮肥吸收利用效率的协同提高。

参考文献

- [1] 马冬云, 郭天财, 查菲娜, 等. 种植密度对两种穗型冬小麦旗叶氮代谢酶活性及籽粒蛋白质含量的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(3): 514-517
- [2] 周江明, 赵琳, 董越勇, 等. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274-281
- [3] Wang H, McCaig T N, DePauw R M, et al. Physiological characteristics of recent Canada Western Red Spring wheat cultivars: Components of grain nitrogen yield[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2003, 83(4): 699-707
- [4] Guberac V, Martincic J, Maric S, et al. Grain yield components of winter wheat new cultivars in correlation grain yield and sowing rate[J]. Res Common, 2000, 28(3): 307-314
- [5] Carr P M, Horsley R D, Poland W W. Tillage and seeding rate effects on wheat cultivars[J]. Crop Science, 2003, 43(1): 202-209
- [6] Carr P M, Horsley R D, Poland W W. Tillage and seeding rate effects on wheat cultivars[J]. Crop Science, 2003, 43(1): 210-218
- [7] Lam H M, Coschigano K T, Oliveira I C, et al. The molecular-genetics of nitrogen assimilation into amino acids in higher plants[J]. Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1996, 47(1): 569-593
- [8] 杨永光, 张维城, 吴玉娥, 等. 播量对小麦产量和籽粒营养品质的影响[J]. 河南职业技术学院学报, 1989, 17(S1): 56-59
- [9] Flowers M, Weisz R H, Einiger R, et al. In-season optimization and site-specific nitrogen management for soft red winter wheat[J]. Agronomy Journal, 2004, 96: 124-134

- [10] 王月福, 于振文, 李尚霞, 等. 氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(2): 55-59
- [11] 田纪春, 张忠义, 梁作勤. 高蛋白和低蛋白小麦品种的氮素吸收和运转分配差异的研究[J]. 作物学报, 1994, 20(1): 76-83
- [12] 张庆江, 张立言, 毕恒武. 春小麦品种氮的吸收积累和转运特征及与籽粒蛋白质的关系[J]. 作物学报, 1997, 23(6): 712-718
- [13] 赵会杰, 邹琦, 郭天财, 等. 密度和追肥时期对重穗型冬小麦品种 L906 群体辐射和光合特性的调控效应[J]. 作物学报, 2002, 28(2): 270-277
- [14] Gooding M J, Pinyosinwat A, Ellis R H. Responses of wheat grain yield and quality to seed rate[J]. The Journal of Agricultural Science, 2002, 138(3): 317-331
- [15] 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
- [16] 郭伟, 于立河, 崔丽亚. 密度及干物质运转对龙麦 26 小麦产量及品质的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2003, 15(3): 17-20
- [17] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency to nitrogen utilization[J]. Agronomy Journal, 1982, 74(3): 562-564
- [18] Dhugga K S, Waines J G. Analysis of nitrogen accumulation and use in bread and durum wheat[J]. Crop Science, 1989, 29(5): 1232-1239
- [19] 童依平, 李继云, 李振声. 不同小麦品种(系)吸收利用氮素效率的差异及有关机理研究[J]. 西北植物学报, 1999, 19(2): 270-277
- [20] 于文明. 不同施氮量条件下密度对小麦产量和品质的影响及其生理基础[D]. 山东: 山东农业大学, 2006
- [21] 童依平, 李继云, 刘全友, 等. 收获后不同小麦品种土壤硝态氮残留量的差异研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(2): 251-253
- [22] Barraclough P B, Howarth J R, Jones J, et al. Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement[J]. European Journal of Agronomy, 2010, 33(1): 1-11
- [23] Foulkes M J, Hawkesford M J, Barraclough P B, et al. Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects[J]. Field Crops Research, 2009, 114(3): 329-342
- [24] 张国平, 张光恒. 小麦氮素利用效率的基因型差异研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(4): 331-336
- [25] Osaki M, Makoto L, Toshiaki T. Ontogenetic changes in the contents of Ribulose-1, 5-Bisphosphate carboxylase/oxygenase, phosphoenolpyruvate carboxylase, and chlorophyll in individual leaves of maize[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1995, 41(2): 285-293
- [26] Moll R H, Jackson W A, Mikkelsen R L. Recurrent selection for maize grain yield: Dry matter and nitrogen accumulation and partitioning changes[J]. Crop Science, 1994, 34(4): 874-881
- [27] 郭天财, 查菲娜, 马冬云, 等. 种植密度对两种穗型冬小麦品种籽粒糖含量和淀粉积累的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(4): 128-132