

高产与中产麦田小麦产量和光能及氮素利用效率的差异

李传梁¹, 于振文¹, 石 玉¹, 张永丽¹, 张 娟²

(1.山东农业大学农学院,作物生物学国家重点实验室,农业农村部作物生理生态与耕作重点实验室,
山东 泰安 271018; 2.济宁市兖州区农业技术推广中心,山东 济宁 272106)

摘要: 研究高产与中产麦田小麦产量、光能和氮素利用效率的差异,为缩小产量和资源利用率差,实现小麦高产高效生产提供理论依据。选取高产田和中产田 2 块麦田,常年小麦产量水平分别为 9 000,7 500 kg/hm²。以小麦品种“烟农 1212”为供试材料,分析不同产量水平麦田光能利用和氮素利用的差异。结果表明,高产田植株拔节期、开花期和成熟期氮素积累量较中产田提高 6.65%~11.25%,开花前氮素向籽粒中的转运量较中产田提高 11.60 kg/hm²,开花后氮素同化量较中产田提高 21.99 kg/hm²。开花后 14~28 天旗叶氮代谢酶活性均表现为高产田显著高于中产田。高产田土壤氮素表观盈亏量较中产田减少 48.61%。高产田开花期和开花后 7~28 天叶面积指数和旗叶 SPAD 值较中产田分别提高 6.89%~34.56%和 8.45%~27.32%;开花期和开花后 7~28 天高产田冠层光能有效辐射截获率和截获量较中产田提高 3.92%~7.70%和 3.97%~7.85%。高产田籽粒产量较中产田提高 26.71%,光能利用率和氮素利用率分别提高 17.39%和 19.50%。综上所述,高产田小麦开花后冠层光能有效辐射截获率和营养器官贮存氮素向籽粒的转运量高,提高小麦成熟期籽粒中氮素的积累量,进而提高产量、光能利用率和氮素利用率,同时减少土壤氮素表观盈亏量,减少氮素损失。

关键词: 小麦; 产量; 光能利用; 氮素利用

中图分类号:S512.1;S153.6 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)06-0340-06
DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.041

Differences in Wheat Yield, Light Energy and Nitrogen Use Efficiency Between High-Yield and Medium Yield Wheat Fields

LI Chuanliang¹, YU Zhenwen¹, SHI Yu¹, ZHANG Yongli¹, ZHANG Juan²

(1.College of Agronomy, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tai'an, Shandong 271018; 2.Jining Yanzhou District Agricultural Technology Extension Center, Jining, Shandong 272106)

Abstract: This study aimed to study the differences of wheat yield, light energy and nitrogen use efficiency between high-yield and medium-yield wheat fields, so as to provide a theoretical basis for reducing the difference of yield and resource use efficiency and realizing high-yield and high-efficiency production of wheat. Two wheat fields with high and medium yield were selected, and their annual wheat yield was about 9 000 kg/hm² and 7 500 kg/hm² respectively. The wheat variety Yannong 1212 was used as test material to analyze the difference of light and nitrogen utilization in wheat field at different yield levels. The results showed that the nitrogen accumulation in the high-yield field was 6.65%~11.25% higher than those in the medium-yield field at jointing, flowering and maturity stages, the nitrogen transport to grain before flowering was 11.60 kg/hm² higher than that in the middle field, and the nitrogen assimilation after flowering was 21.99 kg/hm² higher than that in the middle field. From 14 to 28 days after anthesis, the activities of nitrogen metabolic enzymes in flag leaves in high-yield fields were significantly higher than those in medium-yield fields. The apparent surplus and deficit of soil nitrogen in high-yield field decreased by 48.61% compared with that in medium-yield field. The leaf area index and SPAD value of flag leaf in high-yield fields were 6.89%~34.56%

and 8.45%~27.32% higher than those in medium-yield fields at flowering and 7~28 days after flowering, respectively. At flowering stage and 7~28 days after flowering, the interception rate and amount of solar energy available radiation in high-yield fields were 3.92%~7.70% and 3.97%~7.85% higher than those in medium-yield fields. The grain yield of high-yield field was 26.71% higher than that of medium-yield field, and the light energy utilization rate and nitrogen utilization rate were 17.39% and 19.50% higher respectively. To sum up, the interception rate of effective light energy radiation in canopy and the transport of nitrogen stored in vegetative organs to grains are high in high-yield fields after wheat flowering, which improves the accumulation of nitrogen in grains at maturity, thus improving the yield, light energy utilization and nitrogen utilization, reducing the apparent nitrogen surplus and deficit in soil and reducing nitrogen loss.

Keywords: wheat; yield; light energy utilization; nitrogen use

华北平原(NCP)是我国重要的小麦产区,小麦产量约占全国小麦总产量的 2/3^[1]。大量研究^[2-3]指出,我国华北平原冬小麦产量可达 7 600~9 400 kg/hm²,同时,利用 ASPIM 模型研究了华北平原地区冬小麦产量差时空变化,指出冬小麦产量差可达产量潜力的 15%~80%^[4],但该地区平均产量仅为 6 200~6 800 kg/hm²^[5],造成这种产量差异的原因之一在于连年不同的耕作、施肥等管理措施导致麦田土壤肥力不同,并由此造成土壤养分供应水平和小麦产量存在差异。因此,分析不同产量水平麦田光能和氮素资源利用的差异,对缩减产量差、实现小麦生产的高产高效具有重要意义。

冠层对光合有效辐射(PAR)的截获和利用是影响产量的重要因素^[6]。小麦冠层截获的光合有效辐射与叶面积指数呈显著正相关^[7]。较高的叶面积指数有利于提高光合有效辐射截获量,提高作物光合产物的积累。小麦植株对氮素的吸收、利用受土壤肥力的影响。不同土壤肥力下土壤养分供应能力和特征不同,作物对养分吸收和利用特征也有所不同^[8]。对不同产量潜力小麦品种的研究^[9]发现,成熟期小麦积累的氮素 70.20%~79.27%来自土壤,较高土壤供氮能力下,植株吸收更多的土壤氮素。小麦籽粒中的氮素约有 65%来自开花前贮藏在营养器官中氮素的再转运,35%来自花后的氮素吸收^[10]。有研究^[11]认为,高产小麦在开花期以后仍然具有较高的氮素吸收能力,并且生长后期提高氮素吸收量利于提高产量。籽粒氮素含量与硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(Nir)和谷氨酰胺合成酶(GS)等活性关系密切,较高的氮代谢酶活性有利于促进氮素的积累与转运,进而提高籽粒产量和氮素利用率^[12-13]。

小麦高产研究成效显著,已有 10 500 kg/hm²高产典型及 9 000 kg/hm²的较大面积的麦田^[5,14-15],但在华北平原大面积生产尚未达到 9 000 kg/hm²以上的高产水平;而且因生态环境、品种、栽培技术等诸多

原因,使区域间发展极不平衡。前人研究小麦光能和氮素利用对产量的影响多在高产水平麦田进行,对于高、中产田产量差异形成的原因研究较少。因此,本研究在山东省高、中产田研究其光能利用特性、氮素利用特征及产量形成特点存在的差异,对提高氮素利用率和光能利用率、缩小产量差、定向培育高产麦田、促进小麦产量持续增产稳产具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大田试验在山东省济宁市兖州区小孟镇史王村试验站(35°40'N,116°41'E)进行,研究地属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 13.5 ℃,无霜期约为 211 天,年均日照时间 2 567 h,年均降水量 703 mm。试验田前茬作物为玉米,一年两熟种植,多年秸秆还田。试验田土壤类型均为褐潮土,质地均为中壤,播前 0—20 cm 土层土壤养分含量见表 1。

表 1 播前耕层土壤养分含量

地块	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)
高产田	14.22	1.02	121.79	116.97	32.25
中产田	11.69	0.86	100.31	97.92	25.25

1.2 试验设计

选取高产田和中产田 2 块麦田,常年产量水平分别为 9 000,7 500 kg/hm²。供试冬小麦品种为“烟农 1212”,小区面积 20 m²(2 m×10 m),小区间设 2 m 保护行。3 次重复。

试验田总施肥量为纯 N 210 kg/hm²,P₂O₅ 135 kg/hm²,K₂O 150 kg/hm²。基施氮肥于小麦播种前与全部磷钾肥一同施入,追施氮肥于拔节期开沟施入,基施氮肥和追施氮肥比例为 5 : 5。氮、磷、钾肥分别选用尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)和硫酸钾(含 K₂O 50%)。2020 年 10 月 8 日播种,播种密度均为 180×10⁴株/hm²,于小麦拔节期和开花期进行灌溉,抽穗期和灌浆初期进行病虫害防治,

2021 年 6 月 13 日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株氮素积累量 在小麦越冬期、拔节期、开花期和成熟期随机选取 30 个单茎,分为茎、叶、穗(成熟期分为籽粒和穗轴+颖壳),于 105 ℃ 杀青 30 min,70 ℃ 烘干至恒重,称重,采用凯氏定氮法测定各器官氮素含量^[16],计算地上部氮素积累量。

1.3.2 旗叶氮代谢酶活性 小麦开花期标记同一天开花的单茎,于小麦开花期及开花后 7,14,21,28 天,取标记旗叶,用液氮速冻后置于-80 ℃ 冰箱中保存,用于测定 NR、Nir 和 GS 活性。NR、Nir 和 GS 活性采用苏州格锐思生物科技有限公司提供的酶试剂盒测定^[17]。

1.3.3 土壤矿质氮含量 于播种前和成熟期取 0—200 cm 土样,20 cm 为 1 层,用 1 mol/L KCl 溶液提取,采用德国产 AA-3 型连续流动分析仪测定无机氮含量^[18]。

1.3.4 旗叶 SPAD 值 采用 CCM-200 型叶绿素仪于开花期及开花后 7,14,21,28 天上午的 9:00—11:00 测定旗叶 SPAD 值,每处理测定长势一致的 10 片旗叶^[19]。

1.3.5 叶面积指数(LAI)、冠层光合有效辐射截获率和透射率 采用英国产 Sunscan 作物冠层分析仪,于小麦开花期及开花后 7,14,21,28 天的晴朗天气,分别测定植株底部和顶部的 LAI 和 PAR。采用公式(1)~公式(3)计算 PAR 截获率(PAR_i)、截获量(IPAR)和透射率(PART)^[20]。

$$PAR_i = (PAR_1 - PAR_2) / PAR_1 \times 100\%$$
 (1)

$$IPAR = R \times PAR_i \times 0.5$$
 (2)

$$PART = PAR_2 / PAR_1 \times 100\%$$
 (3)

式中:PAR_i为测定当天的 PAR 截获率(%);PAR₁和 PAR₂分别为小麦植株顶部和底部的 PAR[μmol/(m²·s)];IPAR 为测定当天的 PAR 截获量(MJ/m²);R 为测定当天的实际光能总辐射量(MJ/m²),其数据来源于试验基地气象观测站;PART 为测定当天 PAR 透射率(%)。

1.3.6 光合有效辐射转化率(PCE)和利用率(PUE) 于小麦开花期和成熟期每个处理取 30 株小麦,105

℃ 杀青 30 min,80 ℃ 下烘干至恒重后称重.利用公式(4)~公式(6)分别计算干物质净积累量、PAR 转化率(PCE)和利用率(PUE)^[20]。

$$M_n = M_2 - M_1$$
 (4)

$$PCE = M_n / PAR$$
 (5)

$$PUE = (PAR_i / R) \times PCE$$
 (6)

式中:M_n为开花期至成熟期干物质净积累量(g/m²);M₁为开花期干物质质量(kg/hm²);M₂为成熟期干物质质量(kg/hm²);PAR_i为开花至成熟阶段 PAR 截获量(MJ/m²)。

1.3.7 氮素利用率及其相关指标计算 各相关指标参照郑飞娜等^[21]介绍的方法进行。

土壤供氮量(kg/hm²)=施氮量(kg/hm²)+播前 0—100 cm 土层土壤无机态氮积累量(kg/hm²) (7)

氮素利用率(NUE, kg/hm²)=籽粒产量(kg/hm²)/供氮量(kg/hm²) (8)

氮素吸收效率(NupE, %) = 成熟期地上部氮素积累量(kg/hm²)/供氮量(kg/hm²)×100% (9)

氮素表观盈亏量(kg/hm²)=底施氮肥前 0—200 cm 土层土壤矿质氮量(kg/hm²)+施氮量(kg/hm²)-成熟期 0—200 cm 土层土壤矿质氮残留总量(kg/hm²)-成熟期植株氮素积累量(kg/hm²) (10)

1.3.8 籽粒产量 成熟期选取长势均匀的区域进行人工收割、脱粒,风干至含水量为 12.5%得到籽粒产量^[2]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 26 软件进行统计分析。采用单因素和 LSD 法进行方差分析和多重比较(α=0.05),用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同产量水平麦田植株氮素积累与转运的差异

由表 2 可知,不同产量水平麦田越冬期植株氮素积累量无显著差异,拔节期、开花期和成熟期高产田植株氮素积累量显著高于中产田,说明高产田有利于提高拔节期至成熟期植株氮素积累量。不同产量水平麦田成熟期氮素在茎秆+叶鞘内的积累量表现为中产田显著高于高产田,成熟期籽粒中氮素积累量表现为高产田较中产田提高 17.46%,表明高产田显著提高成熟期植株内氮素在籽粒中的积累。

表 2 小麦各生育时期植株氮素积累量 单位:kg/hm²

处理	越冬期	拔节期	开花期	成熟期			
				叶片	茎秆+叶鞘	穗轴+颖壳	籽粒
高产田	62.67a	195.76a	240.19a	11.03a	29.04b	12.95a	226.02a
中产田	60.45a	178.23b	225.21b	12.34a	33.72a	12.34a	192.42b

注:表中数字后不同小写字母表示处理间差异达显著水平(p<0.05)。下同。

由表 3 可知,高产田植株花前氮素向籽粒中的转运量较中产田提高 11.60 kg/hm²,转运率无显著差

异,对籽粒的贡献率表现为中产田显著高于高产田。开花后高产田氮素同化量较中产田提高 21.99 kg/

hm²,对籽粒的贡献率较中产田提高 6.10%,表明高产田协同提高小麦植株花前氮素向籽粒的转运量和花后氮素同化量,并显著提高花后氮素同化量对籽粒的贡献率,从而提高氮素在籽粒的积累量。

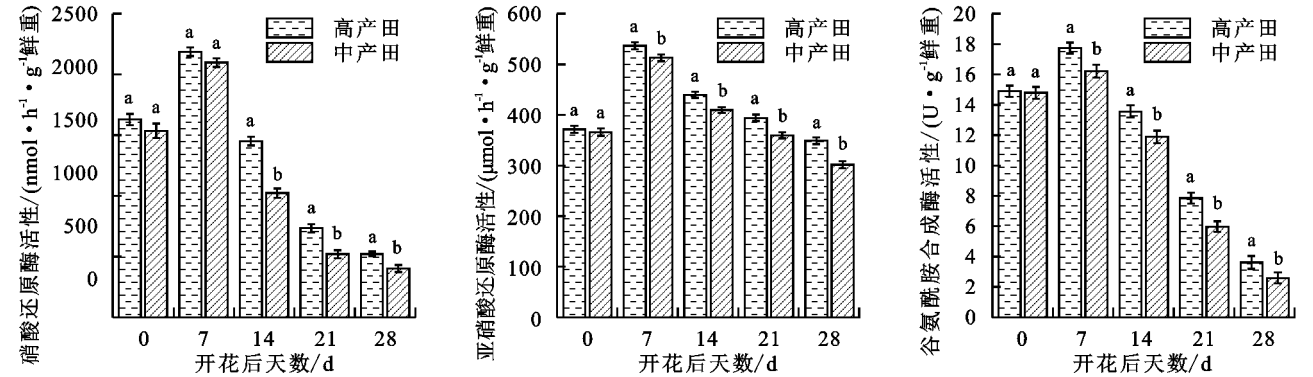
表 3 小麦氮素积累、转运及对籽粒氮素贡献率

处理	开花前氮素向籽粒转运			开花后氮素同化量	
	转运量/	转运率/	对籽粒氮素贡献率/	同化量/	对籽粒氮素贡献率/
	(kg·hm ⁻²)	%	%	(kg·hm ⁻²)	%
高产田	156.97a	65.35a	69.45b	69.04a	30.55a
中产田	145.37b	64.55a	75.55a	47.05b	24.45b

2.2 不同产量水平麦田旗叶 NR、Nir 和 GS 活性的差异

由图 1 可知,开花期和开花后 7 天,旗叶 NR 和 Nir 活性均表现为 2 个产量水平麦田无显著差异,开花后 14,21,28 天,高产田旗叶 NR 和 Nir 活性较中产田分别提高 30.17%~41.96%和 7.32%~15.59%。开花期旗叶

GS 活性表现为 2 个产量水平麦田无显著差异,开花后 7,14,21,28 天,高产田旗叶 GS 活性较中产田提高 14.07%~31.45%。表明高产田小麦开花后旗叶保持较高的 NR、Nir、GS 活性,且旗叶衰老慢,氮代谢能力强。较高的氮代谢酶活性促进小麦氮代谢途径的运转,进而促进氨基酸的合成和转化,有利于氮素的积累。



注:不同小写字母表示处理间差异达显著水平($p<0.05$)。下同。
图 1 小麦开花后旗叶 NR、Nir 和 GS 活性的差异

2.3 不同产量水平麦田氮素表现盈亏量的差异

由表 4 可知,播前 0—200 cm 土层土壤矿质氮总量、成熟期 0—200 cm 土层土壤矿质氮残留总量和成熟期植株氮素积累量均表现为高产田显著高于中产

田,氮素表现盈亏量表现为中产田显著高于高产田。表明高产田较高的播前土壤矿质氮总量为小麦植株生长提供充足的养分,并在小麦生育期固定更多的土壤氮素,显著减少土壤氮素损失。

表 4 土壤氮素表现盈亏的差异 单位:kg/hm²

处理	氮素输入		氮素输出		氮素表现盈亏量
	播前 0—200 cm 土层	施氮量	成熟期 0—200 cm 土层	成熟期植株	
	土壤矿质氮总量		土壤矿质氮残留总量	氮素积累量	
高产田	479.31a	210a	397.29a	279.04a	12.98b
中产田	431.39b	210a	365.31b	250.82b	25.26a

2.4 不同产量水平麦田叶面积指数和旗叶 SPAD 值的差异

由图 2 可知,叶面积指数表现为开花期和开花后 7~28 天,高产田显著高于中产田。旗叶 SPAD 值表现为开花期高产田和中产田无显著差异,开花后 7~28 天旗叶 SPAD 值表现为高产田显著高于中产田。表明高产田显著提高小麦籽粒灌浆期间的叶面积指数和 SPAD 值,有利于充分利用光能,促进籽粒灌浆。

2.5 不同产量水平麦田冠层光能截获率、透射率和截获量的差异

由表 5 可知,开花期和开花后 7~28 天,不同产量水平麦田 PAR 截获率、透射率和截获量差异显著,高产

田 PAR 截获率和截获量较中产田分别提高 3.92%~7.70%和 3.97%~7.85%,中产田 PAR 透射率较高产田提高 31.54%~66.48%,表明高产田显著提高籽粒灌浆期间小麦冠层对光能的捕获,减少漏光损失。

2.6 不同产量水平麦田籽粒产量和资源利用效率的差异

由表 6 可知,高产田穗数、穗粒数和产量较中产田分别提高 12.99%,6.94%和 26.52%,千粒重表现为 2 个产量水平麦田无显著差异。高产田光能转化率和光能利用率较中产田分别提高 12.34%和 17.39%,氮素利用率和氮素吸收效率较中产田分别提高 19.50 和 5.08%,表明高产田通过提高穗数和穗

粒数来提高籽粒产量,并协同提高光能利用率和氮素利用率。

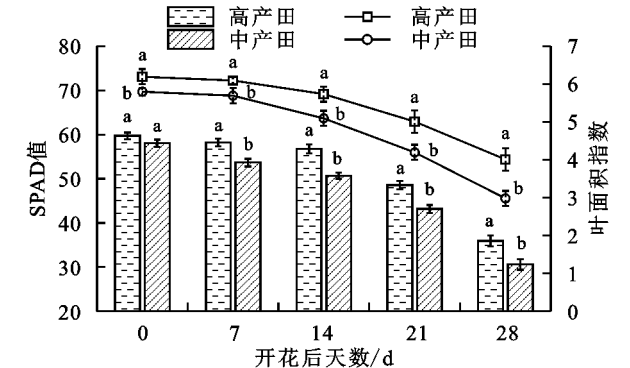


图 2 小麦开花后叶面积指数和旗叶 SPAD 值

表 5 小麦开花后群体冠层光能截获率				
开花后 天数/d	处理	PAR 截获率/%	PAR 透射率/%	PAR 截获量/ (MJ·m ⁻²)
0	高产田	94.63a	5.37b	11.24a
	中产田	91.06b	8.94a	10.81b
7	高产田	93.59a	6.41b	9.76a
	中产田	89.10b	10.90a	9.29b
14	高产田	89.55a	10.45b	8.12a
	中产田	86.35b	13.65a	7.83b
21	高产田	84.59a	15.41b	8.67a
	中产田	80.33b	19.67a	8.23b
28	高产田	81.52a	18.48b	7.96a
	中产田	75.69b	24.31a	7.38b

表 6 籽粒产量和资源利用效率

处理	穗数/ (×10 ⁴ 穗·hm ⁻²)	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	光能转化率/ (g·MJ ⁻¹)	光能利用率/ (g·MJ ⁻¹)	氮素利用率/ (kg·kg ⁻¹)	氮素吸收效率/ %
高产田	611.59a	39.58a	45.79a	9487.52a	2.73a	1.35a	23.41a	68.86a
中产田	541.26b	37.01b	44.25a	7498.56b	2.43b	1.15b	19.59b	65.53b

3 讨 论

3.1 不同产量水平麦田氮素吸收利用的差异

提高营养器官中氮素的转运量和开花后氮素的同化量,有利于促进氮素向籽粒转运,进而提高氮素利用率。在 7 000,8 000,9 000 kg/hm² 的产量水平下,小麦植株氮素积累量分别为 251.86,290.74,312.50 kg/hm²[22-23]。高产田小麦花前氮素转运量和对籽粒的贡献率较低产量水平麦田小麦无显著差异,花后氮素积累量较低产量水平麦田小麦提高 8.03%^[24]。本研究表明,小麦植株氮素积累量自拔节期开始有显著差异,之后差异逐渐增大,高产水平麦田小麦开花前氮素向籽粒的转运量和开花后氮素同化量均显著高于中产水平麦田,为提高成熟期籽粒氮素积累量奠定基础。同时,有研究^[12]表明,旗叶氮代谢酶活性与籽粒氮素积累量呈显著正相关,本研究中,高产水平麦田小麦植株在灌浆中后期维持较高的旗叶氮代谢酶活性,提高籽粒灌浆期氮素转化能力,从而提高小麦对氮素吸收利用的能力,这是高产田具有更高的籽粒氮素积累量的原因。同时,高产田土壤在小麦生育期内固定更多氮素,显著降低氮素损失,进一步提高氮素利用率。

3.2 不同产量水平麦田光能利用和产量形成的差异

合理的叶面积指数和旗叶 SPAD 值有利于构建良好的群体结构,有利于充分利用光能,提高光合性能和光能利用率^[25]。本研究表明,高产田小麦开花期至成熟期叶面积指数和旗叶 SPAD 值均显著高于中产田。有研究^[17]发现,籽粒产量与开花后 2,20 天的 PAR 截获率、转化率和利用率均呈显著正相关。

本研究结果表明,高产田小麦开花期至成熟期冠层光能有效辐射截获率和截获量较中产田分别提高 3.71%~7.70% 和 3.70%~7.85%。说明高产田提高了光能利用率,保证籽粒灌浆期间充足的养分供应,为提高小麦产量提供物质基础。有研究^[26]表明,9 500 kg/hm² 产量水平条件下,“郑麦 7698”千粒重和 8 000 kg/hm² 产量水平条件无显著差异,穗数和穗粒数显著高于 8 000 kg/hm² 产量水平条件。本研究亦表现相似结果,高产田穗数、穗粒数和产量较中产田分别提高 12.99%,6.94% 和 26.52%,而千粒重表现为无显著差异。表明高产田通过提高穗数和穗粒数来提高籽粒产量。中产田在培肥地力的同时,可适当增加穗数,提高冠层光能有效辐射截获率和截获量,通过提高光能利用率来提高产量。

4 结 论

与 7 500 kg/hm² 的中产田比较,9 000 kg/hm² 的高产田开花后旗叶具有较高的氮代谢酶活性,促进氮素的同化,协同提高开花前氮素向籽粒的转运量和开花后氮素同化量,显著降低土壤氮素表观盈亏量,提高氮素利用率;高产田开花至成熟期具有较高的叶面积指数和旗叶 SPAD 值,提高光能有效辐射截获率、截获量和光能利用率;高产田通过提高单位面积穗数和穗粒数获得高产。

参考文献:

[1] Lu C H, Fan L. Winter wheat yield potentials and yield gaps in the North China Plain[J].Field Crops Research, 2013,143:98-105.

[2] 吴金芝,黄明,李友军,等.耕作方式和氮肥用量对旱地

- 小麦产量、水分利用效率和种植效益的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):264-271.
- [3] 袁浩,王继唯,李赟虹,等.氮肥基追比对小麦产量、土壤水氮分布及利用的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):299-307.
- [4] Li K N, Yang X G, Liu Z J, et al. Low yield gap of winter wheat in the North China Plain[J]. *European Journal of Agronomy*,2014,59:1-12.
- [5] 任思洋,张青松,张福锁,等.华北平原五省冬小麦产量和氮素管理的时空变异[J].中国农业科学,2019,52(24):4527-4539.
- [6] Zhao H X, Zhang P, Wang Y Y, et al. Canopy morphological changes and water use efficiency in winter wheat under different irrigation treatments[J]. *Journal of Integrative Agriculture*,2020,19(4):1105-1116.
- [7] 王健波,严昌荣,刘恩科,等.长期免耕覆盖对旱地冬小麦旗叶光合特性及干物质积累与转运的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):296-305.
- [8] 杜盼,张娟娟,郭伟,等.施氮对不同肥力土壤小麦氮营养和产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(2):176-186.
- [9] 吴培金,闫素辉,张从宇,等.应用¹⁵N分析施氮量对弱筋小麦氮素吸收利用与产量的影响[J].中国土壤与肥料,2019(4):121-126.
- [10] 刘运景,郑飞娜,张秀,等.宽幅播种对强筋小麦籽粒产量、品质和氮素吸收利用的影响[J].作物学报,2022,48(3):716-725.
- [11] 阳显斌,张锡洲,李廷轩,等.不同产量水平小麦的氮吸收利用差异[J].核农学报,2010,24(5):1073-1079.
- [12] Balotf S, Kavoosi G, Kholdebarin B. Nitrate reductase, nitrite reductase, glutamine synthetase, and glutamate synthase expression and activity in response to different nitrogen sources in nitrogen-starved wheat seedlings[J]. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 2016,63(2):220-229.
- [13] Zhang S, Gho L G, Han L, et al. The effects of N input level on N uptake, N remobilization and agronomic traits under deficit irrigation condition in winter wheat[J]. *Turkish Journal of Field Crops*,2019,24(1):111-120.
- [14] 董策,李炎艳,张希太,等.2013—2021年河北省审定小麦品种产量及农艺性状分析[J].山东农业科学,2022,54(5):24-29.
- [15] 王改革,任宁,汪洋,等.2014—2018年河南省冬小麦施肥现状及增产潜力评价[J].农学学报,2022,12(2):8-15.
- [16] 李瀚,邓良基,朱双,等.成都平原农业废弃物施用对冬小麦氮素吸收转运的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):96-100.
- [17] 王海琪,黄艺华,蒋桂英,等.氮肥基追比例对滴灌春小麦氮代谢及氮肥利用率的影响[J].水土保持学报,2022,36(1):297-306,315.
- [18] Miao Y F, Wang Z H, Li S X. Relation of nitrate N accumulation in dryland soil with wheat response to N fertilizer[J]. *Field Crops Research*,2015,170:119-130.
- [19] 王磊,董树亭,刘鹏,等.水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):301-308.
- [20] 卢小兰,于振文,石玉,等.不同穗型小麦光能利用和旗叶¹³C同化物分配特性及对补灌水平的响应[J].应用生态学报,2019,30(11):3745-3752.
- [21] 郑飞娜,初金鹏,贺明荣,等.播种方式与种植密度互作对大穗型小麦品种产量和氮素利用率的调控效应[J].作物学报,2020,46(3):423-431.
- [22] 韩占江,于振文,王东,等.测墒补灌对冬小麦氮素积累与转运及籽粒产量的影响[J].生态学报,2011,31(6):1631-1640.
- [23] 傅晓艺,王红光,李瑞奇,等.不同水分处理对小麦氮素和干物质积累与分配的影响[J].麦类作物学报,2020,40(8):955-963.
- [24] 王茂莹,贺明荣,李玉,等.施氮量对不同小麦品种产量及氮素吸收利用的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):241-248.
- [25] Yue X L, Zhang Y C, Zhang H Z, et al. Optimizing the nitrogen management strategy for winter wheat in the North China Plain using rapid soil and plant nitrogen measurements[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*,2019,50(11):1310-1320.
- [26] 李艳,彭超军,王玉民,等.两种肥力水平下冬小麦氮素吸收运转和代谢研究[J].麦类作物学报,2019,39(9):1072-1079.