



邵云,李巧,王雪平,张乾琛,赵玉歌,张雨萌.不同肥密调控下小麦群体结构及其生理生态特征动态变化[J].中国农业大学学报,2025,30(12):187-198.
SHAO Yun, LI Qiao, WANG Xueping, ZHANG Qianchen, ZHAO Yuge, ZHANG Yumeng. Dynamic changes of population structure and its physiological-ecological characteristics in wheat under different fertilizer and density regulations[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(12): 187-198.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.16

不同肥密调控下小麦群体结构及其生理生态特征动态变化

邵云 李巧 王雪平 张乾琛 赵玉歌 张雨萌

(河南师范大学 生命科学学院, 河南 新乡 453007)

摘要 为探究高施肥量且高种植密度(高肥高密度)的组合栽培模式对小麦群体结构、冠层生理生态及产量的影响,利用田间定位试验,于2023—2024年在河南省焦作市修武县设置高肥高密度(HT)、中肥中密度(MT)和低肥低密度(LT)3种栽培模式处理,以分别模拟现实生产中超高产栽培模式、高产栽培模式和农民传统栽培模式,测定了小麦群体数量、叶面积指数、地上干物质、单茎绿叶数、顶叶叶夹角、抽穗后冠层温度、旗叶光合特征、光合有效辐射截获率及光能利用效率等群体结构特征和冠层生理生态指标,同时测定了小麦产量并对以上指标对产量贡献进行了主成分分析。结果表明:1)HT处理通过增加基本苗,显著提高了越冬—返青期的群体数量($P<0.05$),其开花期叶面积指数较MT和LT处理分别提高10.14%和13.76%,为高产群体构建奠定了结构基础;2)HT处理下充足的养分供给促使单茎绿叶数增多,顶叶叶夹角减小,趋于直立型分布,有利于群体内光分布优化,同时抽穗后冠层温度变化平缓,减少高温胁迫对籽粒灌浆的不利影响;3)HT处理提高了上层冠层光合有效辐射截获率,较MT和LT分别提高14.81%和19.23%,同时旗叶净光合速率显著提升($P<0.05$),进一步增强了群体光能利用效率,从而使得HT处理籽粒产量较MT和LT分别增加7.99%和29.27%。综上,高肥高密度条件通过优化小麦群体结构、改善冠层群体内生理生态及提升光合能力,促进了高产群体的形成,为豫北地区小麦持续高产栽培技术提供了理论支撑。

关键词 小麦;施肥量;种植密度;群体结构;冠层生理生态;光能利用效率;产量

中图分类号 S512.1 文章编号 1007-4333(2025)12-0187-12 文献标志码 A

Dynamic changes of population structure and its physiological-ecological characteristics in wheat under different fertilizer and density regulations

SHAO Yun, LI Qiao, WANG Xueping, ZHANG Qianchen, ZHAO Yuge, ZHANG Yumeng

(College of Life Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract To investigate the effects of high fertilizer application rate and high planting density (HT) cultivation pattern on wheat population structure, canopy physiological and ecology, and grain yield, a field positioning experiment was conducted in Xiuwu County, Jiaozuo City, Henan Province during the 2023 to 2024 period. Three cultivation treatments were set up, including high fertilizer and high density (HT), medium fertilizer and medium density (MT), and low fertilizer and low density (LT), which simulated the super-high-yield, high-yield, and traditional farmer cultivation patterns in actual production, respectively. We surveyed and measured some population structural characteristics and canopy eco-physiological indicators, including population density, leaf area index (LAI), aboveground dry matter, green leaves per stem, flag leaf angle, post-heading canopy temperature, flag leaf photosynthetic traits, photosynthetically active radiation (PAR) interception rate, and

收稿日期: 2025-07-30

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2023YFD2301504-03);教育部学位与研究生教育发展研究中心主题案例项目(ZT-2410476001)

第一作者: 邵云(ORCID:0009-0007-0576-9686),教授,主要从事作物栽培生理生态与农业资源高效利用研究, E-mail:shaoyun73@126.com

radiation use efficiency (RUE). Concurrently, wheat yield was determined, and principal component analysis (PCA) was performed to evaluate the contribution of these measured indicators to grain yield. The results showed that: 1) The population size was significantly increased in the HT treatment from the overwintering stage to the green-up stage by increasing the number of basic seedlings ($P < 0.05$). At the flowering stage, the LAI was 10.14% and 13.76% higher than that of the MT and LT treatments, respectively, laying a structural foundation for the construction of a high-yield population. 2) Sufficient nutrient supply under the HT treatment promoted an increase in the number of green leaves per stem and a decrease in the top leaf angle, showing an upright distribution trend, which was conducive to optimizing the light distribution within the population. Meanwhile, the canopy temperature changed gently after heading, reducing the adverse effects of high-temperature stress on grain filling. 3) The PARIR of the upper canopy in the HT treatment was increased by 14.81% and 19.23% compared with that in the MT and LT treatments, respectively. At the same time, the net photosynthetic rate of flag leaves was significantly improved ($P < 0.05$), which further enhanced the population LUE. As a result, the grain yield of the HT treatment was increased by 7.99% and 29.27% compared with that of the MT and LT treatments, respectively. In conclusion, in the high fertilizer and high density cultivation pattern, the formation of a high-yield wheat population is promoted by optimizing the population structure, improving the canopy physiological ecology, and enhancing the photosynthetic capacity, which provides a support for the sustainable high-yield cultivation practices of wheat in northern Henan Province.

Keywords wheat; fertilizer application rate; planting density; population structure; eco-physiology of canopy architecture; radiation use efficiency; yield

2023年中央一号文件《关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见》^[1]明确将“实施新一轮千亿斤粮食产能提升行动”作为重点工作,山东、河南等农业大省率先开展“吨半粮”示范区建设。华北麦区作为我国最重要的粮食生产基地,其小麦种植面积、总产量和单产水平均居全国四大麦区之首^[2],其中河南冬小麦产量最高,占全国总产量的1/4,在我国粮食安全格局中具有举足轻重的地位^[3],以2023年为例,河南小麦总产量高达3 549.73万t。王立红等^[4]研究表明,在增密条件下小麦群个体的协调发展是产量提升的关键因素。在此背景下,深入探究小麦冠层特性与产量形成的关系,不仅有助于推动农业绿色高效生产,更能为保障国家粮食安全提供重要的理论支撑和技术指导。小麦抽穗后绿叶持续时间与其抗逆性密切相关^[5],小麦冠层的叶夹角直接反映叶面积指数大小^[6],且冠层相关指数与作物生长特性密切相关^[7]。殷文等^[8]研究表明,灌浆期冠层温度与小麦产量呈显著相关关系,可作为产量预测的重要生理指标。光合作用是小麦产量形成的物质基础^[9],而冠层光能利用效率是衡量群体光合性能的关键指标^[10],反映了作物将光能转化为生物量的能力^[11]。在小麦生产中,种植密度和施肥水平是调控群体结构和光合效率的两大核心农艺措施,二者协同影响冠层光

辐射分布、叶片光合特性及物质积累与分配^[12]。肥料管理是调控小麦干物质积累的关键农艺措施,增施肥量则能提高干物质积累速率^[13]。光合生理特性是决定产量的关键因素,而合理的冠层结构能有效提升群体光能利用效率,充分发挥作物生产潜能^[14]。探究施肥量和种植密度耦合对小麦冠层光能利用效率的影响,对优化高产高效栽培模式具有重要理论价值与实践意义。因此,本研究在河南省小麦高产产区之一——焦作市修武县开展试验,设置高肥高密度(HT)、中肥中密度(MT)和低肥低密度(LT)3个处理,通过测定小麦的群体数量、叶面积指数、单茎绿叶数、顶叶叶夹角、冠层温度、旗叶光合特征、光能利用效率、地上干物质和产量等,旨在解析施肥量和种植密度组合措施对小麦群体结构和冠层光能利用的调控。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点选择在河南省焦作市修武县(35°17'N, 113°43'E),该区域属于温带大陆性季风气候,耕地土壤类型为壤土。本试验于2023年10月—2024年6月开展,该小麦季的降水量和平均气温分别为125.99 mm和15.48℃,其降水量、最高温度和最低温度如图1所示。

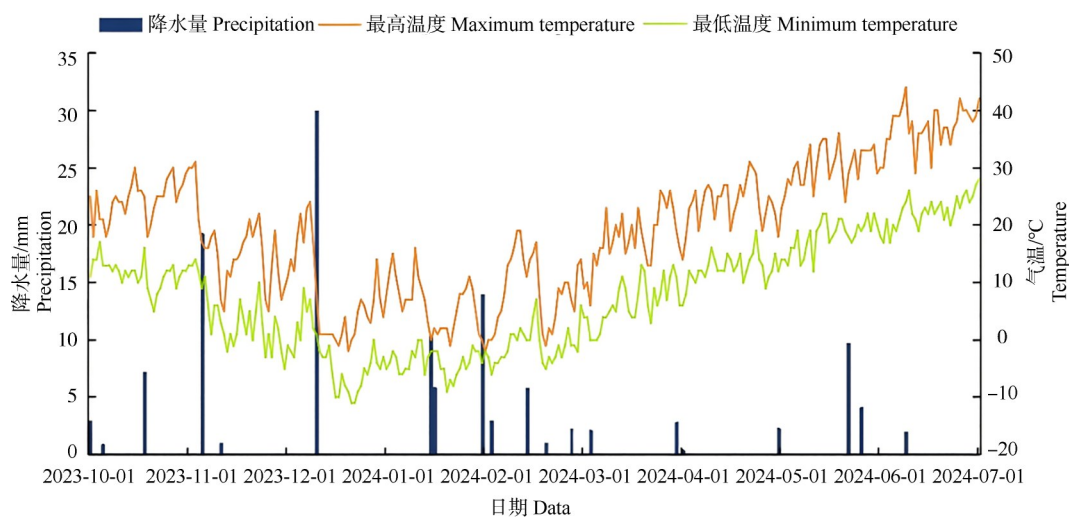


图 1 试验地小麦季降水量与温度

Fig. 1 Precipitation and temperature in the experimental field during the wheat-growing season

1.2 试验设计

依托 2018 年启动的长期定位试验平台,于 2023—2024 年小麦季开展相关指标的测定。试验前茬作物为玉米,取小麦播前(2023-10-09)耕层(0—20 cm)土样进行养分测定,基础土壤养分含量见表 1。为模拟小麦超高产、高产和农民传统栽培 3 种典型种植模式,设计了 3 个肥力-密度组合处理,

分别为高肥高密度(HT)、中肥中密度(MT)和低肥低密度(LT),小区具体施肥情况和播种密度见表 2。试验采用大区对比设计,大区面积 500 m²,为长 25 m×宽 20 m,设置 3 次重复。整地前将各处理的底肥均匀撒开,翻入土壤中。于 2023-10-20 采用条播机完成小麦播种,行距为宽行 17 cm+窄行 11 cm。试验田采用高产田方式进行管理。

表 1 小麦播前基础土壤养分含量

Table 1 Basic soil nutrient content before wheat sowing

处理 Treatment	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total nitrogen	硝态氮/(mg/kg) NO ₃ -N	铵态氮/(mg/kg) NH ₄ ⁺ -N	全磷/(g/kg) Total phosphorus
HT	21.44	1.29	32.41	8.94	0.61
MT	20.75	1.25	27.67	7.93	0.52
LT	18.56	0.94	28.53	7.67	0.47

注:HT 为高肥料高密度处理组,MT 为中肥料中密度处理组,LT 为低肥料低密度组。下同。

Note: HT stands for the high-fertilizer and high-density treatment group, MT stands for the medium-fertilizer and medium-density treatment group, LT stands for the low-fertilizer and low-density group. The same below.

于小麦越冬期(WS, 2023-12-11)、返青期(RS, 2024-02-26)、拔节期(JS, 2024-03-20)、开花期(FS, 2024-04-21)、灌浆期(GS, 2024-05-03)和成熟期(MS, 2024-06-04)在田间记录小麦的群体数量和单茎绿叶数,测量叶面积指数和地上干物质量。从拔节期开始记录小麦顶叶叶夹角。在成熟期(MS, 2024-06-04)进行小麦产量测定。

分别于小麦抽穗后第 0 天(2024-04-08)、第 10 天(2024-04-18)、第 20 天(2024-04-28)、第 30 天(2024-05-08)和第 40 天(2024-05-18)在田间测小

麦的冠层温度和旗叶的光合参数,在灌浆期测小麦的光合有效辐射。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 测定方法

在长势均匀的区域,选 1 m 双行小麦植株,测定小麦群体数量,3 次重复。随机选取小麦,记录单茎绿色叶片数,15 次重复。利用角度尺测小麦顶叶叶夹角,10 次重复。在小麦冠层利用温度计测小麦的冠层温度,5 次重复。

选择无风晴朗天气在上午 9:00—11:30,使用

表2 不同处理种植密度与施肥水平

Table 2 Different treatments of planting density and fertilization levels

处理 Treatment	种植密度/ (万/hm ²) Seeding density	有机肥/(kg/hm ²) Organic fertilizer			底肥/(kg/hm ²) Base fertilize			基追比 Base- Topdressing ratios	总养分/(kg/hm ²) Total nutrient rate		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
HT	525.0	8.10	9.20	6.05	148.50	165.00	41.25	1.16:1.00	291.60	174.20	47.30
MT	450.0	7.60	7.65	5.40	135.00	165.00	37.50	1.41:1.00	243.85	172.65	42.90
LT	375.0	3.96	3.96	2.61	121.50	148.50	33.75	1.24:1.00	226.71	152.46	36.36

注:有机肥为当地购买的农家腐熟干鸡粪(N:1.62%,P:1.84%,K:1.21%);底肥种类为金正大复合肥,追肥种类为尿素含量≥43%。
Note: The organic fertilizer used was matured dry chicken manure purchased by local farmers (N: 1.62%, P: 1.84%, K: 1.21%). The basal fertilizer was Jinzhengda compound fertilizer, and urea (N≥43%) was applied as the top-dressing fertilizer.

便携式光合测定仪(LI-6400,美国LI-COR公司)测定旗叶净光合速率(Pn)、胞间二氧化碳浓度(Ci)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr),5次重复。利用SunScan植物冠层分析仪(英国DELTA-T公司)测定小麦群体内3层高度入射光的光合有效辐射,包括第1层(穗上层,距地面65 cm高)PAR_顶、第2层(穗下层,距地面45 cm高)PAR_中和第3层(底层,距地面5 cm高)PAR_底,5次重复。利用SunScan植物冠层分析仪测定小麦叶面积指数(LAI),10次重复。

随机取1 m双行小麦植株,在105℃下杀青30 min,80℃烘干至恒重后称重,3次重复。小麦成熟期,在田间随机选取1 m²收割后测定穗数,统计穗粒数,20次重复。脱粒后随机测量千粒重和实际产量,5次重复。

1.3.2 计算方法

群体数量的计算,于每个随机样点选取1 m双行,测定其总茎数。单位面积群体数量计算公式如下:

$$PQ = \frac{N}{2D} \times 667 \times 15 \div 10\,000 \tag{1}$$

式中:PQ为单位面积群体数量,万/hm²;N为1 m双行内的总茎数,株;D为行距,m。

不同生育时期群体数量的差值计算方法如下:

$$\Delta PQ = X_2 - X_1 \tag{2}$$

式中:ΔPQ为不同生育期群体数量的差值,万/hm²;X₁和X₂分别为相邻2个时期的群体数量,万/hm²。

根据小麦群体内3个高度,即穗上层、穗下层和底层入射光的光合有效辐射PAR,以相邻2个高度的PAR计算小麦群体内上层(即穗层,距地面45—60 cm)、下层(距地面5—45 cm)的光合有效辐射截

获率(CR)、截获量(IPAR)和透射率(PeR),计算公式如下:

$$CR = \frac{PAR_n - PAR_{n-1}}{PAR_{顶}} \times 100\% \tag{3}$$

$$IPAR = R \times CR \times 0.5 \tag{4}$$

$$PeR = \frac{PAR_n}{PAR_{n-1}} \times 100\% \tag{5}$$

式中:n为小麦群体内从上到下的高度层次,n=1(距地面65 cm)、2(距地面45 cm)和3(距地面5 cm);R为实际光合有效辐射总量,μmol/(m²·s)。群体光能利用效率计算公式如下:

$$RUE_Y = H \times \frac{Y}{\Delta Q} \times 100\% \tag{6}$$

式中:RUE_Y为光能利用效率,%;H为粮食作物烘干后干质量热值,表示单位质量的干物质燃烧时释放出的热量,MJ/kg,作物为17.58 MJ/kg;Y为单位面积作物籽粒产量,kg/hm²;ΔQ为作物生长期间的太阳总辐射差,MJ/m²。

1.4 数据处理及分析

采用Microsoft Excel 2021 软件进行数据处理与制图,采用SPSS Statistics 26.0 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理下小麦群体结构

2.1.1 小麦群体数量差值

由表3所示的不同处理小麦相邻2个时期的群体数量差值可知,小麦的群体数量在越冬—返青期差值最大,此时期HT处理的群体数量差值远远高于MT和LT处理,HT处理相比MT和LT处理分别显著提高了33.87%和35.38%(P<0.05)。HT

表 3 不同处理下小麦生育阶段群体数量差值

Table 3 Difference in wheat population quantity between growth stages under different treatments 万/hm²

处理 Treatment	越冬—返青 WS-RS	返青—拔节 RS-JS	拔节—开花 JS-AS	开花—灌浆 AS-GS	灌浆—成熟 GS-MS
HT	1 094.36±35.08 a	-219.49±38.06 a	-182.72±19.25 a	-329.59±21.16 a	-35.90±12.82 b
MT	817.50±8.84 b	-223.50±11.81 a	-68.00±10.67 b	-291.50±19.49 b	-59.50±10.95 a
LT	808.34±15.43 b	-222.80±11.64 a	-74.32±10.45 b	-278.60±19.14 b	-59.64±10.81 a

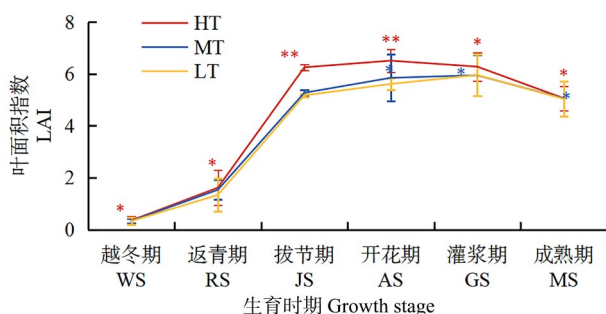
注: 同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters after the values within the same columns indicate significant differences among the treatments ($P<0.05$). The same below.

处理在灌浆—成熟期差值明显低于MT和LT处理,此时期HT处理相比MT和LT处理分别显著下降了39.66%和39.81%($P<0.05$)。HT处理在返青期促进了群体充分发展,并在灌浆期维持群体稳定,不仅有利于构建充足的单位面积穗数,而且为后期的籽粒灌浆奠定了坚实的物质基础,是实现高产的重要群体特征。

2.1.2 小麦叶面积指数

由图2所示的不同处理下小麦叶面积指数可知,3个处理下小麦LAI随生育进程均呈现典型的单峰曲线变化趋势,峰值出现在开花—灌浆期,其中返青—拔节期为LAI的快速上升阶段。HT处理在整个生育期内始终维持较高的LAI水平,HT处理下的叶面积指数相比MT和LT处理增幅分别为0.16%~15.69%和0.51%~17.29%,这种增长趋势在拔节期和开花期均差异显著($P<0.05$)。在拔节期,HT处理的LAI较MT和LT处理分别提高15.69%和17.29%;在开花期,HT处理的LAI较MT和LT处理分别提高10.14%和13.76%。



以LT为对照,*和**分别表示HT或LT在0.05和0.01水平差异显著和极显著。下同。

With LT as the control, * and ** indicate significant and highly significant differences at the 0.05 and 0.01 levels in HT or LT, respectively. The same below.

图2 不同处理下小麦叶面积指数

Fig. 2 Leaf area index of wheat under different treatments

2.1.3 小麦单茎绿叶数

由图3所示的不同处理下小麦单茎绿叶数可知,3个处理下小麦单茎绿叶数在整个生育期内均呈现先升高后降低的动态变化规律,且在拔节期达到峰值。其中,HT处理的小麦单茎绿叶数显著高于其他处理($P<0.05$),具体表现为:拔节期HT处理的小麦单茎绿叶数较MT和LT处理分别极显著增加10.73%和27.52%($P<0.01$),开花期较MT和LT处理分别极显著增加18.49%和26.27%($P<0.01$)。在小麦灌浆期,各处理整株绿叶数均下降,但HT处理降幅最小,表现出更强的持绿性,这种差异使HT处理拥有更多的绿叶数,有利于小麦干物质的积累。

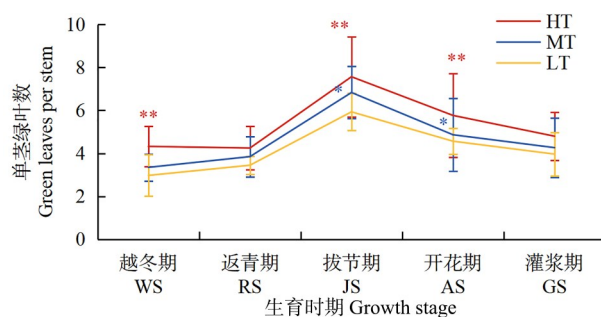


图3 不同处理下小麦单茎绿叶数

Fig. 3 Number of green leaves per tiller of wheat under different treatments

2.1.4 小麦顶叶叶夹角

由图4所示的不同处理下小麦顶叶叶夹角可知,从拔节期开始,各处理顶叶叶夹角整体呈现先下降后上升再下降的变化趋势。在拔节期,HT处理的顶叶叶夹角显著低于MT和LT处理($P<0.05$),降幅分别达8.25%和10.55%。然而,HT处理相较于MT和LT处理,从拔节期至抽穗期,HT处理的

顶叶叶夹角增长和下降速度较为缓慢,变化趋势较为稳定。在拔节期HT处理相较于MT和LT处理的顶叶叶夹角较小,促进小麦向直立叶型转变,有利于优化群体冠层结构,提高光能利用率。

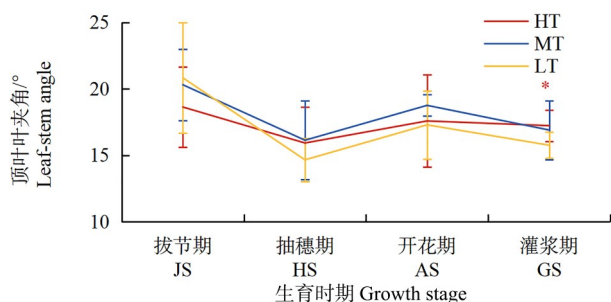


图4 不同处理下小麦顶叶叶夹角

Fig. 4 Leaf inclination angle of the top leaves of wheat under different treatments

2.2 不同处理下小麦群体生理生态特征

2.2.1 小麦抽穗后冠层温度

由图5所示的不同处理下小麦抽穗后冠层温度可知,HT、MT和LT的小麦冠层温度变化趋势相似,均呈现先缓慢上升后下降的趋势。在抽穗后10 d,各处理间无显著差异($P>0.05$)。然而,在抽穗后20 d,LT处理的冠层温度显著高于MT和HT处理($P<0.05$),分别提高了10.13%和15.82%。

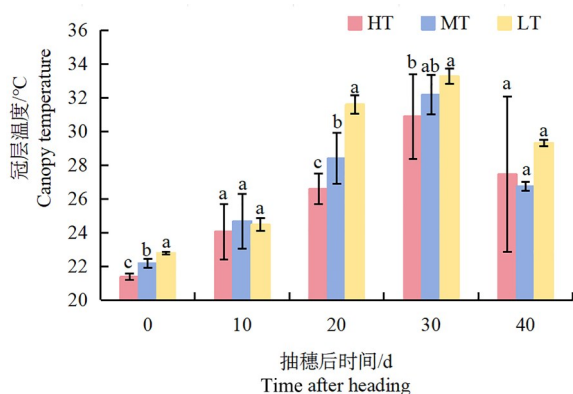


图5 不同处理下小麦抽穗后冠层温度

Fig. 5 Canopy temperature of wheat after heading under different treatments

2.2.2 小麦抽穗后旗叶光合生理特征

不同处理下小麦抽穗后旗叶光合生理特征见图6。由图6(a)可知,各处理下小麦旗叶Pn,在抽穗后0~40 d均呈先增后降的变化趋势,在抽穗后20 d达到最大值。抽穗后20~30 d,HT与LT相比Pn

值显著提高($P<0.05$),增幅达34.14%~29.86%;抽穗后30~40 d,MT相较于LT的Pn值显著提高33.83%~12.45%($P<0.05$)。3种处理的Pn在抽穗后0~40 d的平均增幅以HT最高,MT次之,LT最低,且3种处理之间差异显著($P<0.05$)。

由图6(b)可知,各处理下小麦旗叶的Gs在抽穗后0~40 d的变化趋势与Pn的变化趋势一致,HT相较于LT在抽穗后30 d的Gs增幅最大,达70.03%;MT相较于LT在抽穗后20 d Gs提高了24.74%。

由图6(c)可知,HT处理下抽穗后40 d旗叶的Ci较MT无显著差异($P>0.05$),但较LT显著降低($P<0.05$)。HT处理下抽穗后40 d内的Ci较LT下降了3.32%~23.49%,下降幅度较大;MT处理下抽穗后40 d的Ci较LT下降了3.48%~19.37%;HT处理下抽穗后40 d的Ci较MT下降了3.35%~7.44%,下降幅度最小。总体上HT和MT相较于LT均出现了下降趋势,HT下降幅度最大,MT下降幅度其次。

由图6(d)可知,在抽穗期后,小麦旗叶的Tr随着生育天数的推进出现先增长后降低的趋势。在抽穗后30 d内,HT处理下旗叶的Tr明显高于MT和LT,HT相比于LT处理下旗叶的Tr提高了16.20%~62.96%,在抽穗后10 d增幅达到最大值。

2.2.3 小麦灌浆期光合有效辐射

由表4所示的灌浆期不同处理小麦光合有效辐射可知,在小麦灌浆期,HT处理的小麦冠层光能利用效率显著高于其他处理($P<0.05$)。HT处理的冠层总有效辐射截获率达92.07%(上层+下层),较MT和LT分别提高5.22%和7.74%。其中,上层差异较为显著,HT上层截获率较MT和LT分别显著增加15.89%和20.70%($P<0.05$),表明增密增肥管理后,冠层上部叶片的光能捕获能力得到显著提升。光合有效辐射透射率表现为LT>MT>HT,其中HT透射率最低,与冠层截获率呈负相关。

2.2.4 小麦光能利用效率

由表5所示的不同处理小麦光能利用效率可知,整个小麦季HT处理下光能利用率相较于MT和LT分别显著提高14.81%和19.23%($P<0.05$)。在拔节一开花期,光能利用效率达到峰值,HT处理在该时期的光能利用效率较MT和LT分别显著提高13.03%和23.52%($P<0.05$),HT模式能够维

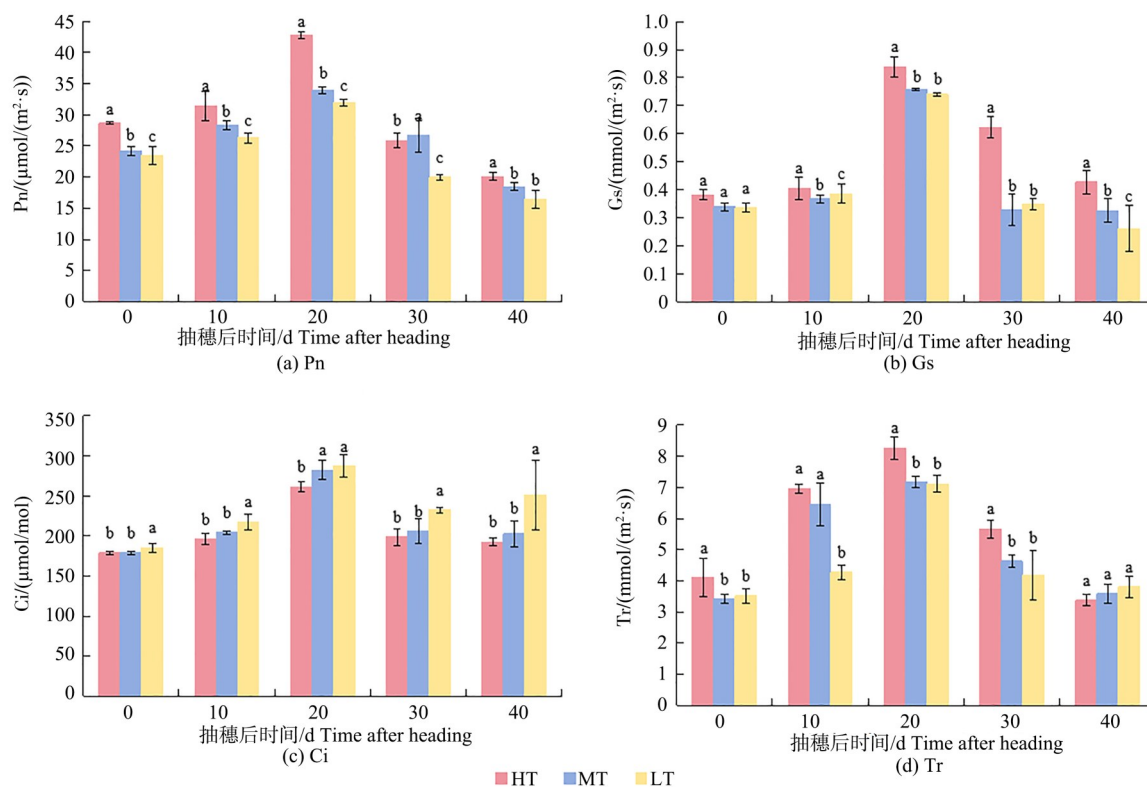


图 6 不同处理下小麦抽穗后旗叶光合生理特征

Fig. 6 Photosynthetic physiological characteristics of flag leaves of wheat after heading under different treatments

表 4 灌浆期不同处理小麦光合有效辐射

Table 4 Photosynthetically active radiation of wheat under different treatments during the grain-filling stage

指标 Index	处理 Treatment	层次 Layer		总计 Total
		上层	下层	
		Upper layer	Lower layer	
CR/% PAR interception rate	HT	75.56 a	16.51 b	92.07 a
	MT	63.56 b	23.71 ab	87.26 b
	LT	59.92 b	25.02 a	84.94 c
IPAR/($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Intercepted PAR	HT	5.02 a	1.10 a	6.11 a
	MT	4.22 b	1.57 a	5.79 b
	LT	3.98 b	1.66 a	5.64 c
PeR/% PAR transmittance	HT	24.44 a	32.78 b	7.93 c
	MT	36.44 b	38.65 ab	12.74 b
	LT	40.08 b	39.16 a	15.06 a

持高效光合器官功能和优化冠层光分布,实现光能利用效率的最大化,为高产奠定能量基础。

2.3 不同处理下小麦干物质质量和籽粒产量

2.3.1 小麦地上干物质质量

由图 7 所示的不同处理下小麦地上干物质质量可

知,不同处理的小麦地上干物质质量随生育进程持续增加,整体表现 HT>MT>LT,表明 HT 处理显著促进小麦植株干物质质量的积累。在成熟期,HT 处理的干物质质量较 MT 和 LT 分别极显著提高 14.54% 和 18.98% ($P<0.01$),MT 较 LT 增幅达 3.87%。

表5 不同处理小麦光能利用效率

Table 5 Light-use efficiency of wheat under different treatments %

处理 Treatment	生育时期 Growth stage			总光能利用效率 RUE _y
	播种—拔节	拔节—开花	开花—成熟	
	SS-JS	JS-FS	FS-MS	
HT	0.82	10.06	1.70	1.55
MT	0.71	8.75	1.51	1.35
LT	0.72	7.70	1.49	1.30

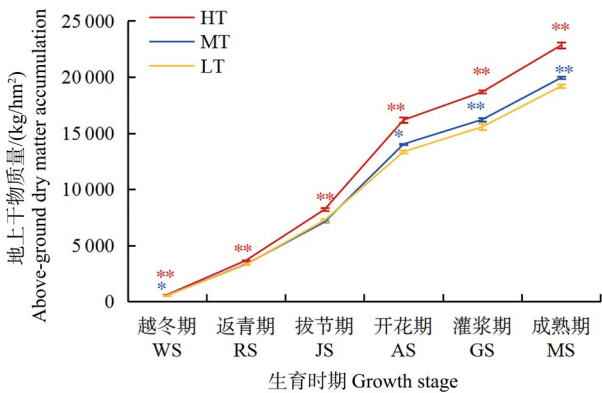


图7 不同处理下小麦地上干物质量

Fig. 7 Above-ground dry matter accumulation of wheat under different treatments

在小麦整个生育期,HT处理相较于MT和LT处理的差距在拔节期开始显现,其后差距逐渐变大。干物质量与产量呈显著正相关,HT的高干物质积累有利于其高产的形成。

2.3.2 小麦籽粒产量及其构成因素

由表6所示的不同处理小麦籽粒产量及其构成因素可知,3种处理下小麦的产量差异显著($P<0.05$),HT处理下小麦穗粒数和穗数显著增加

($P<0.05$),千粒重无显著影响($P>0.05$)。HT处理下的小麦平均穗数相比MT和LT分别显著提高了4.48%和18.61%($P<0.05$),平均穗粒数相比MT和LT分别显著提高了4.78%和5.24%($P<0.05$)。HT处理下小麦的产量相比MT和LT增加了7.99%和29.27%。与LT处理相比,MT处理下的小麦穗数提高了12.71%,产量增加了19.70%。

表6 不同处理小麦籽粒产量及其构成因素

Table 6 Grain yield and its components of wheat under different treatments

处理 Treatment	穗数/(万/hm ²) Spike number	穗粒数/(粒/穗) Kernels per spike	千粒重/g 1 000-grain weight	实际产量/(kg/hm ²) Yield
HT	599.03±4.58 a	44.27±0.12 a	42.19±1.03 a	10 708.87±50.58 a
MT	569.20±2.89 a	42.25±0.91 b	41.76±0.31 a	9 916.16±45.22 b
LT	505.03±8.66 b	42.37±1.21 b	41.49±0.45 a	8 283.98±43.99 c

2.4 小麦群体特征对籽粒产量贡献的分析

为分析小麦群体结构和冠层生理生态等指标对籽粒产量的影响,将小麦不同生育时期的群体数量、叶面积指数、地上干物质、单茎绿叶数、抽穗后

冠层温度、旗叶净光合速率和顶叶叶夹角等不同37个群体形态结构、生理生态特征元素进行主成分分析,结果见表7。根据特征值 $\lambda\geq 1$ 的原则,提取了1个主成分,特征值为37.741,方差贡献率为

表 7 小麦不同生育时期田间指标主成分分析旋转后的载荷矩阵

Table 7 Rotated loading matrix of principal component analysis for field indicators of wheat at different growth stages

指标 Index	成分 1 Principle component 1	指标 Index	成分 1 Principle component 1
产量 Yield	0.92	开花期 LAI LAI at AS	1.00
抽穗 30 d 冠层温度 Canopy temperature 30 d after heading	-0.54	拔节期地上干物质 Dry matter accumulation at JS	1.00
抽穗 30 d Pn Pn 30 d after heading	0.39	开花期地上干物质 Dry matter accumulation at AS	0.99
抽穗期顶叶叶夹角 Leaf stem angle at HS	-0.02	灌浆期地上干物质 Dry matter accumulation at GS	-0.99
开花期顶叶叶夹角 Leaf stem angle at AS	0.41	成熟期地上干物质 Dry matter accumulation at MS	-0.99
拔节期单茎绿叶数 Green leaves per stem at JS	1.00	抽穗 0 d Pn Pn 0 d after heading	1.00
开花期单茎绿叶数 Green leaves per stem at AS	-1.00	抽穗 10 d Pn Pn 10 d after heading	0.99
越冬期 LAI LAI at WS	1.00	灌浆期顶叶叶夹角 Leaf stem angle at GS	0.99

82.045%，能够反映不同时期小麦群个体及冠层的基本信息。特征向量对应的载荷值较高的是产量、越冬期除外的群体数量、小麦整个生育期叶面积指数、小麦整个生育期单茎绿叶数、小麦整个生育期地上干物质积累量等，主要反映了小麦群个体及冠层的相关指标。成分 1 与抽穗后 30 d 的 Pn(0.39)、开花期(0.41)和抽穗期的叶夹角(-0.02)均呈负相关，其中与产量相关的是灌浆期顶叶叶夹角(0.99)、越冬期 LAI(1.00)、开花期 LAI(1.00)、拔节期地上干物质(1.00)、开花期地上干物质(0.99)、灌浆期地上干物质(0.99)、成熟期地上干物质(-0.99)、抽穗 0 d Pn(1.00)和抽穗 10 d 的 Pn(0.99)。

3 讨 论

3.1 不同处理对小麦群体结构的影响

本研究通过分析不同施肥量和种植密度对小麦群个体结构的调控作用，揭示了其在现代高产栽培中的重要意义。小麦群体数量是衡量群体规模的重要指标，其动态变化直接影响成穗率和最终产量^[15]。张金丹等^[16]研究发现，小麦玉米同步增密可进一步提高间作增产优势。小麦营养生长阶段合理肥水管理有利于小麦茎秆的发育^[17]，这与 HT 处

理在越冬—返青期群体数量差值显著高于其他处理的试验结果相一致。因此，为有效调控小麦群体结构，在生产中应该适量增加小麦种植密度和加强冬前管理。随着小麦群体数量的增加，为利用更多的光能，小麦植株会向直立型转变。小麦产量与灌浆期叶面积指数呈现正相关，合理的群体结构，开花期叶面积指数保持在 6.8~7.4，灌浆期叶面积指数保持在 4.8~5.4^[18]。郝倩倩等^[19]研究发现，通过施氮和种植密度可有效调节小麦花后的叶面积指数，有助于提高小麦光合产物的积累，这与本研究中 HT 处理在开花期的 LAI 较 MT 和 LT 处理分别提高 10.14% 和 13.76% 的结果一致。与此同时，高氮肥的施入为叶片发育提供了充足的营养，使 HT 处理在整个生育期都维持了相对较多的单株绿叶数，增加了小麦地上干物质，这与陈耀宇等^[20]研究证明功能绿叶面积大和衰老缓慢使产量更高的结果一致。小麦在高肥料高密度的条件下，其群体数量增大，使小麦的顶叶叶夹角变小，这与李国强等^[21]研究中的施氮提高了各叶位茎叶夹角的结果相一致。因此，本试验中 HT 处理下越冬—返青期群体数量增长迅速，开花期能维持较大的叶面积指数；且整个生育期内，由于施肥量的合理增加，使得单茎绿叶数更多，顶叶叶夹角更小。

3.2 不同处理对小麦群体生理生态特征的影响

本研究中,HT处理在灌浆期表现出显著的生理优势,抽穗后40 d冠层温度变化较小,有利于提高产量,这与Huang等^[22]得出的相对变化较小的冠层温度和冬小麦产量成正相关的研究结果一致。随着气候变暖,较高的冠层温度会对植被生产力产生不利影响^[23],本研究中HT处理处于较低冠层温度,其群体结构相对MT和LT更为合理,降低了小麦高温胁迫的危害。HT处理下小麦在维持较高群体数量数的基础上,高肥料的投入增强了小麦抽穗后旗叶的Pn。江继顺等^[24]研究表明,产量在10 500 kg/hm²的水平下,在开花后21 d,小麦旗叶的Pn达18.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,旗叶功能期延长有利于产量的提升、光合功能持续高效,光合与灌浆同步兴衰,这是高产的光合生理特性之一^[25]。通过对光合有效辐射截获率分析发现,HT处理冠层上部光合有效辐射截获率为75.56%,显著高于其他处理。各层营养器官干物质积累量、籽粒及总干物质积累量与上层、中层的光合有效辐射截获率呈显著正相关,与下层无显著相关性^[26],上层+中层的冠层光合有效辐射截获率比上中下3层对产量增加的贡献更大^[27]。HT处理下小麦光能利用率较MT和LT分别提高14.81%和19.23%,这与郭丹丹等^[28]关于光能利用率相对较高直接影响小麦籽粒产量的研究结论一致。由此可见,HT处理的冠层温度维持相对低水平,提高了小麦抽穗后旗叶的Pn,同时降低Ci浓度,增大了小麦上层光合有效辐射截获,提高了小麦光能利用效率。

3.3 不同处理对小麦干物质和籽粒产量的影响

本研究中,HT处理的地上干物质在成熟期达22 836 kg/hm²,与MT和LT处理相比提高了14.54%和18.98%。张春燕等^[29]研究表明,适宜的肥料施用量可以提高春小麦的产量,使高产春小麦具有较高水平的干物质和转运能力以及养分吸收和利用能力^[30]。本试验条件下,HT处理下的小麦籽粒产量相比MT和LT增加了7.99%和29.27%。

主成分分析表明,与产量相关度较高的是越冬期和开花期的叶面积指数、拔节期的地上干物质、抽穗期的净光合速率。此结果与杜宇笑等^[31]的研究得出的较高的干物质积累量和植株氮积累量是提高小麦产量的主要原因以及王云凤等^[32]报道的小麦花期叶面积指数大能提高氮利用效率达到增

产的结果一致。

4 结 论

本研究通过比较不同施肥量和密度处理对冬小麦生长及产量的影响,主要得出如下结论:增加种植密度可提高小麦越冬一返青期的群体数量,增大小麦开花期的叶面积指数,同时优化了冠层结构,减小了顶叶叶夹角,显著提升了上层PAR截获率和光能利用效率,为高产奠定了基础。此外,高肥量供应进一步促进了单茎绿叶数的增加,维持了冠层温度的稳定性,延长了旗叶功能期,使其在抽穗后保持较高的Pn,从而为籽粒灌浆提供了充足的同化物;小麦产量的提升主要归因于地上干物质、叶面积指数和净光合速率的协同增加。综上,合理的高施肥量高种植密度处理通过增大小麦的群体数量和叶面积指数,为高产奠定了结构基础,同时,通过增肥保证营养供应提高了小麦单茎绿叶数,减小了顶叶叶夹角,增大了冠层上层的光合有效辐射截获率,提升了光能利用效率,达到增产的目的。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央 国务院关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见[EB/OL]. [2025-07-20]. http://www.gov.cn/zhengce/2023-02/13/content_5741370.htm
The Central People's Government of the People's Republic of China. The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council's Opinions on doing a good job in key work for comprehensively promoting rural revitalization in 2023[EB/OL]. [2025-07-20]. http://www.gov.cn/zhengce/2023-02/13/content_5741370.htm (in Chinese)
- [2] 严如玉, 赵希梅, 向风云, 李雅琼, 李绪勋, 司转运, 李鹏慧, 高阳, 李继福. 中国小麦优势区域生产格局及施肥现状研究[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(2): 230-241
Yan R Y, Zhao X M, Xiang F Y, Li Y Q, Li X X, Si Z Y, Li P H, Gao Y, Li J F. Research on the production pattern and fertilization status in China's dominant regions of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(2): 230-241 (in Chinese)
- [3] 周宝元, 马玮, 孙雪芳, 丁在松, 李从锋, 赵明. 冬小麦-夏玉米高产模式周年气候资源分配与利用特征研究[J]. 作物学报, 2019, 45(4): 589-600
Zhou B Y, Ma W, Sun X F, Ding Z S, Li C F, Zhao M. Characteristics of annual climate resource distribution and utilization in high-yielding winter wheat-summer maize double cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(4): 589-600 (in Chinese)
- [4] 王立红, 张宏芝, 王重, 李剑峰, 高新, 时佳, 焦阳, 韩雪, 樊哲儒, 赵奇. 新疆冬小麦不同产量水平群体特性分析[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(5): 594-600
Wang L H, Zhang H Z, Wang Z, Li J F, Gao X, Shi J, Jiao Y, Han X, Fan Z R, Zhao Q. Population characteristics of different yield levels of winter wheat in Xinjiang[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(5): 594-600 (in Chinese)

- [5] Naruoka Y, Sherman J D, Lanning S P, Blake N K, Martin J M, Talbert L E. Genetic analysis of green leaf duration in spring wheat[J]. *Crop Science*, 2012, 52(1): 99-109
- [6] Zhang W Y, Tang L, Yang X, Liu L L, Cao W X, Zhu Y. A simulation model for predicting canopy structure and light distribution in wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 67: 1-11
- [7] Kim D S, Marshall E J P, Brain P, Caseley J C. Effects of crop canopy structure on herbicide deposition and performance[J]. *Weed Research*, 2011, 51(3): 310-320
- [8] 殷文, 柴强, 于爱忠, 赵财, 樊志龙, 胡发龙, 范虹, 郭瑶. 间作小麦秸秆还田对地膜覆盖玉米灌浆期冠层温度及光合生理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4764-4776
- Yin W, Chai Q, Yu A Z, Zhao C, Fan Z L, Hu F L, Fan H, Guo Y. Effects of intercropped wheat straw retention on canopy temperature and photosynthetic physiological characteristics of intercropped maize mulched with plastic during grain filling stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(23): 4764-4776 (in Chinese)
- [9] Ding Q S, Zhen X X, Sadok W. Photosynthesis-driven yield gains in global wheat breeding trials[J]. *Crop Science*, 2025, 65(1): e70005
- [10] 李义博, 陶福禄. 提高小麦光能利用效率机理的研究进展[J]. 中国农业气象, 2022, 43(2): 93-111
- Li Y B, Tao F L. Research progress on the mechanism of high light use efficiency in wheat[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(2): 93-111 (in Chinese)
- [11] 刘涛, 杨晓光, 高继卿, 何斌, 白帆, 张方亮, 刘志娟, 王晓煜, 孙爽, 万能涵, 陈曦, 黄秋婉, 柳晓庆. 不同粮食作物光能利用效率研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 186-193
- Liu T, Yang X G, Gao J Q, He B, Bai F, Zhang F L, Liu X Z, Wang X Y, Sun S, Wan N H, Chen X, Huang Q W, Liu X Q. Radiation use efficiency of different grain crops in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(24): 186-193 (in Chinese)
- [12] Shi Z L, Mao T Y, Ma L, Pan H J, Liu J H, Wang D S, Yang L L, Zhai Y L. Effects of delayed application of nitrogen fertilizer on yield, canopy structure, and microenvironment of winter wheat with different planting densities[J]. *Agronomy*, 2025, 15(2): 502
- [13] Ma L J, Ali M F, Ye Y L, Huang X H, Peng Z L, Naseer M A, Wang R, Wang D. Irrigation and nitrogen management determine dry matter accumulation and yield of winter wheat under dryland conditions[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2024, 210(5): e12745
- [14] 徐彤, 吕艳杰, 邵玺文, 耿艳秋, 王永军. 不同时期化控对密植玉米冠层结构及籽粒灌浆特性的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(2): 472-484
- Xu T, Lyu Y J, Shao X W, Geng Y Q, Wang Y J. Effect of different times of spraying chemical regulator on the canopy structure and grain filling characteristics of high planting densities[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(2): 472-484 (in Chinese)
- [15] Wang C, Cui H X, Jin M, Wang J Y, Li C H, Luo Y L, Li Y, Wang Z L. Effect of combined urea and calcium nitrate application on wheat tiller development, nitrogen use efficiency, and grain yield[J]. *Plants*, 2025, 14(2): 277
- [16] 张金丹, 范虹, 杜进勇, 殷文, 樊志龙, 胡发龙, 柴强. 小麦玉米同步增密有利于优化种间关系而提高间作产量[J]. 作物学报, 2021, 47(12): 2481-2489
- Zhang J D, Fan H, Du J Y, Yin W, Fan Z L, Hu F L, Chai Q. Synchronously higher planting density can increase yield via optimizing interspecific interaction of intercropped wheat and maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(12): 2481-2489 (in Chinese)
- [17] 周吉红, 毛思帅, 孟范玉, 满杰, 佟国香, 刘国明, 罗军, 解春源. 春季灌水
- 和追氮对北京冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(12): 1548-1555
- Zhou J H, Mao S S, Meng F Y, Man J, Tong G X, Liu G M, Luo J, Xie C Y. Effect of irrigation and nitrogen topdressing in spring of wheat in Beijing suburb[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(12): 1548-1555 (in Chinese)
- [18] 翟冬峰, 余维宝, 崔永升, 李豪圣, 曹新有, 张宾, 孔令安, 王法宏, 李华伟. 山东省强筋小麦产量差及高产群体质量指标[J]. 山东农业科学, 2022, 54(9): 29-35
- Zhai D F, Yu W B, Cui Y S, Li H S, Cao X Y, Zhang B, Kong L A, Wang F H, Li H W. Yield gap and high-yield population quality index of strong gluten wheat in Shandong Province[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2022, 54(9): 29-35 (in Chinese)
- [19] 郝倩倩, 兰会杰, 董文楠, 秦保平, 张敏, 蔡瑞国, 杨晴, 李昊昱, 杨敏. 施氮量和种植密度对强筋小麦冠层光截获特性和籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(4): 482-491
- Hao Q Q, Lan H J, Dong W N, Qin B P, Zhang M, Cai R G, Yang Q, Li H Y, Yang M. Effects of nitrogen application amount and plant density on canopy light interception characteristics and grain yield of strong gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(4): 482-491 (in Chinese)
- [20] 陈耀宇, 王曙光, 闫雪, 梁增浩, 史雨刚, 孙黛珍. 不同水分条件下小麦持绿相关性状与产量的关系[J]. 山西农业科学, 2019, 47(6): 991-997
- Chen Y Y, Wang S G, Yan X, Liang Z H, Shi Y G, Sun D Z. Relationships between stay green traits and yield of wheat under different water conditions [J]. *Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(6): 991-997 (in Chinese)
- [21] 李国强, 汤亮, 张文宇, 曹卫星, 朱艳. 施氮量对不同株型小麦品种叶型垂直分布特征的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(1): 127-137
- Li G Q, Tang L, Zhang W Y, Cao W X, Zhu Y. Effect of nitrogen rate on vertical distribution characteristics of leaf-type in wheat with different plant types[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(1): 127-137 (in Chinese)
- [22] Huang G R, Zhang X Y, Wang Z Z, Liu X Y, Guo R, Gu F X, Liu E K, Li S Y, Zhong X L, Mei X R. Effect of plant architecture on the responses of canopy temperature and water use to population density in winter wheat[J]. *Crop Science*, 2024, 64(3): 1874-1886
- [23] 李王轶朴, 宋扬, 王靖. 冠层温度和降水对农牧交错带植被生产力的影响研究[J]. 草地学报, 2022, 30(6): 1319-1327
- Li W Y P, Song Y, Wang J. Impacts of canopy temperature and precipitation on vegetation productivity across agro-pastoral ecotones[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(6): 1319-1327 (in Chinese)
- [24] 江继顺, 石玉, 于振文, 张永丽. 不同产量水平麦田小麦光合特性和¹³C同化物分配的差异[J]. 山东农业科学, 2023, 55(1): 63-68
- Jiang J S, Shi Y, Yu Z W, Zhang Y L. Differences in photosynthetic characteristics and distribution of ¹³C assimilates of wheat in fields with different yield levels[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(1): 63-68 (in Chinese)
- [25] 曹树青, 赵永强, 温家立, 王树安, 张荣铎. 高产小麦旗叶光合作用及与籽粒灌浆进程关系的研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(6): 19-25
- Cao S Q, Zhao Y Q, Wen J L, Wang S A, Zhang R X. Studies on photosynthesis in flag leaves and its relation to grain filling course of high yield wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 19-25 (in Chinese)
- [26] 郑雪娇, 于振文, 张永丽, 石玉. 施氮量对测墒补灌小麦冠层不同层次光截获和干物质分布的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 531-537
- Zheng X J, Yu Z W, Zhang Y L, Shi Y. Effects of nitrogen application rate on light interception and dry matter distribution at different layers in wheat canopy under supplemental irrigation based on measuring soil moisture[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2018, 29(2): 531-537 (in Chinese)
- [27] Kong X, Zhao G S. Increasing yield through wheat cultivar mixture that

- optimizes functional traits within the canopy [J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 151: 126977
- [28] 郭丹丹, 刘哲文, 常旭虹, 王艳杰, 杨玉双, 王玉娇, 王德梅, 赵广才. 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): 82-91
- Guo D D, Liu Z W, Chang X H, Wang Y J, Yang Y S, Wang Y J, Wang D M, Zhao G C. 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): 82-91 (in Chinese)
- [29] 张春燕, 张新疆, 王娟, 李沛玟, 马伟栋, 陈国永, 李再欣, 危常州. 北疆地区高产滴灌春小麦干物质积累和氮磷营养特性[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(5): 642-651
- Zhang C Y, Zhang X J, Wang J, Li P W, Ma W D, Chen G Y, Li Z X, Wei C Z. Dry matter accumulation and N and P nutrition characteristics of high yield drip irrigation spring wheat in northern Xinjiang [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(5): 642-651 (in Chinese)
- [30] 吴晓丽, 李朝苏, 汤永禄, 刘于斌, 李伯群. 氮肥运筹对小麦产量、氮素利用效率和光能利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1889-1898
- Wu X L, Li C S, Tang Y L, Liu Y B, Li B Q, Fan G Q, Xiong T. Effect of nitrogen management modes on grain yield, nitrogen use efficiency and light use efficiency of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1889-1898 (in Chinese)
- [31] 杜宇笑, 李鑫格, 张羽, 程涛, 刘小军, 田永超, 朱艳, 曹卫星, 曹强. 不同产量水平下稻茬小麦的氮素营养指标特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1420-1429
- Du Y X, Li X G, Zhang Y, Cheng T, Liu X J, Tian Y C, Zhu Y, Cao W X, Cao Q. Variation in nitrogen status indicators with grain yield level for winter wheat after rice [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(8): 1420-1429 (in Chinese)
- [32] 王云凤, 杨茂林, 郑景瑞, 刘力, 杜文婷, 罗彩霞, 张树兰. 不同小麦品种产量和氮、磷利用效率差异的生理机制[J]. 西北农业学报, 2023, 32(3): 337-349
- Wang Y F, Yang M L, Zheng J R, Liu L, Du W T, Luo C X, Zhang S L. Physiological mechanism of differences in yield and nitrogen and phosphorus use efficiency of different wheat varieties [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2023, 32(3): 337-349 (in Chinese)

责任编辑: 申青苗



第一作者简介: 邵云, 教授, 河南师范大学生命科学学院教授, 硕士生导师。研究领域为作物栽培生理生态与农业资源高效利用。先后主持和参加“十五”“十一五”“十二五”国家科技支撑计划项目子课题、“十三五”“十四五”国家重点研发计划项目子课题及省厅级科研项目近20项。在国内外期刊发表学术论文50余篇; 主编及参编著作9部, 编译著作1部。获河南省科学技术进步奖三等奖2项。