

DOI: 10.19462/j.cnki.zgzy.20231115005

密度对陕垦 224 光合性状和产量性状的影响

赵小光 赵鹏涛 翟周平 尚毅

(陕西省杂交油菜研究中心, 杨凌 712100)

摘要:为给陕垦 224 的高产栽培提供科学的理论依据,在不同密度水平下测定了小麦的光合气体交换参数、叶片光合相关性状、干物质积累量等光合指标,并对农艺性状及产量进行了分析。结果表明:净光合速率和水分利用效率随着密度的增加一直下降,气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度则随着密度的增加而增加;叶片叶绿素含量、旗叶面积、总叶面积均随着种植密度的增加先升后降,叶面积指数随着种植密度的增加一直升高;单株干物质积累量随着密度增加而下降,折合群体干物质积累量随着密度增加先升后降;有效穗数随着密度增加先升后降,穗粒数和千粒重则随着密度的增加而下降。综合各指标的变化规律,陕垦 224 的适宜种植密度在 15 万~20 万株/667m²。研究结果为陕垦 224 的高光效利用和高产栽培提供了重要的理论参考。

关键词:小麦;陕垦 224;密度;产量;光合性状;高光效

The Effect of Density on Photosynthetic and Yield Traits of Shaanken 224

ZHAO Xiaoguang, ZHAO Pengtao, ZHAI Zhouping, SHANG Yi

(Hybrid Rapeseed Research Center of Shaanxi Province, Yangling 712100, Shaanxi)

小麦是陕西省第一大粮食作物,对全省粮食生产有举足轻重的稳定性作用,小麦生产与全省的粮食丰欠、农村经济发展和人民群众的生活有着直接的联系^[1]。近年来高产优质小麦新品种不断出现,但陕西省的小麦单产水平较低,即使引进外省的高产小麦品种,其单产仍低于山东、河南大部分地区^[2]。小麦的产量既与品种特性有关,又与栽培管理方式相联系,只有良种良法配套,才能充分发挥产量潜力,其产量才有得到较大提升的可能。

光合作用是绿色植物进行能量合成的基础,植物依靠叶绿体将外界的光能转化为有机物并储存下来^[3],光合能力的高低与作物光合产物积累、产量潜力发挥以及品质优劣密切相关^[4]。合理的作物群体结构可形成良好的冠层内光辐射分布,有利于提高光能利用率^[5],而改变栽培密度是调控群体特征的重要途径^[6-7]。合理的栽培密度能有效解决作物群体与个体之间的光能分配,构建出合理的群体结构,增大叶片

的光照面积,从而提高作物群体对光能的利用率,促进产量三要素的协调生长^[8],最终提高作物产量。

小麦是通过群体生产来实现产量增加的,适宜的群体密度是提升作物生长发育和产量构成的关键要素之一^[9]。提高小麦群体光能利用,特别是旗叶与倒二叶的光合速率及有效光合时间对于产量增加十分重要。通过密植能提高小麦群体有效穗数从而提高小麦的产量,迟播小麦需适当增加密度来弥补冬前分蘖数的不足,密植对于增产效果比较明显^[10]。然而随着种植密度的增加,小麦单株鲜重、叶面积指数和群体生长能力降低。由于通风不便,会加重病虫害的发生,且在收获期容易倒伏。因此,密度对小麦光合特性及产量有着显著的影响。研究表明,播种时行株距设置的差异,不仅影响作物冠层光截获和通风透光性,还能有效调控冠层结构、光合产物积累分配及叶片衰老特性等因素^[6,11]。尽管前人对小麦的光合和栽培方式进行了较多的研究^[12-14],但对栽培密度如何通过光合作用来影响小麦产量的研究还有待深入。本研究以普通小麦陕垦 224 为材料,重点分析了不同密度对净光合速率、蒸腾速率、叶绿

素含量、叶面积指数以及干物质积累等光合指标的影响,比较了不同密度下产量性状的差异,为小麦株型构建、高光效品种选育、高产栽培技术提升及优化群体结构提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料 供试品种为普通六倍体小麦陕垦224,由陕西省杂交油菜研究中心提供,2014年通过陕西省农作物品种审定委员会审定(审定编号:陕审麦2014011号),适宜陕西关中灌区中东部中等肥力地区种植。成穗率高,结实性好,株高78cm左右,平均穗粒数41.2,千粒重平均43.3g。2011–2013年度2个年度陕西省关中灌区小麦中肥组区域试验平均产量477.3kg/667m²,比对照小偃22增产4.8%。2012–2013年度陕西省关中灌区小麦生产试验产量469.1kg/667m²,比对照小偃22增产6.4%。

1.2 试验方法 试验于2021–2022年在陕西省杨凌示范区试验基地进行,采用单因素随机区组设计,基本苗设置4个密度的处理水平,分别为D1:10万株/667m²,D2:15万株/667m²,D3:20万株/667m²,D4:25万株/667m²。播种时选用氮、磷、钾总含量为45%(15–15–15)的配方肥作为基肥,每667m²施肥量为50kg,追肥时期为返青期,选用尿素进行追肥,施肥量为10kg。每小区面积为6m²,行距为0.25m,种6行,行长4m,每小区间隔1m,试验设3个重复,田间管理措施均采用当地常规管理方法。

在小麦灌浆中期,选择发育进度相同的单株,用Li-6400便携式光合作用测定仪分别对每个密度水平的旗叶进行测定,选用6400–02B LED红蓝光源叶室,光照强度控制为1300μmol/m²·s;叶室温度控制为25℃,测定时间为上午的8:00–12:00,每个处理测定10个单株。测定的气体交换参数有:净光合速率(μmol/m²·s),气孔导度(mm²/m²·s),蒸腾速率(mm²/m²·s),胞间CO₂浓度(μmol/mL),水分利用

效率(μmol/mmol),其中水分利用效率(WUE)按照公式WUE=净光合速率/蒸腾速率进行计算。用叶绿素测定仪SPAD 502测定每个密度的旗叶叶绿素含量,每个处理测定10个单株,在每个叶片上均匀选取8个点进行测定,取平均值;用Li-3000C叶面积仪测定每个处理的旗叶面积和总叶面积,每个处理测定10株;用LAI-2200冠层分析仪对每个小区测定叶面积指数;每处理选取10个单株,烘干后称重,即为单株干物质积累量,重复3次。

在小麦灌浆后期,测量每个处理下单株的株高(cm),连续测定10株,统计每个处理的折合有效穗数(万穗/667m²);在成熟期,调查每个处理的全生育期天数(d),每个处理选取10个单株统计穗粒数,称重每个小区所有小麦植株的干重计算折合群体干物质积累量(kg/667m²),对每个小区进行测产,并计算折合产量(kg/667m²),将收获的小麦种子混合样进行抽样,测定千粒重。

1.3 数据处理 所有数据用Excel 2003整理后,用SPSS 11.5进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同密度下光合气体交换参数的比较 从表1可以看出,小麦的各个光合气体交换参数对密度的响应变化差异较大。净光合速率随着密度的增加而下降,4个密度水平下的净光合速率均表现出显著性差异,D1的净光合速率比D4高出9.57%。气孔导度随着种植密度的增加而升高,D4的气孔导度比D1显著高出54.90%。蒸腾速率和气孔导度的变化规律相似,也随着密度的增加而升高,D4的蒸腾速率比D1高出34.26%。胞间CO₂浓度随密度的增加而升高,D4的胞间CO₂浓度比D1显著高出15.05%。水分利用效率随密度的增加而下降,D1的水分利用效率比D4显著高出47.03%。所以小麦的个体光合能力是与密度成反比的,由于密度的增加,个体间接

表1 小麦陕垦224不同密度下的光合参数

密度	净光合速率 (μmol/m ² ·s)	气孔导度 (mm ² /m ² ·s)	蒸腾速率 (mm ² /m ² ·s)	胞间CO ₂ 浓度 (μmol/mL)	水分利用效率 (μmol/mmol)
D1	21.87a	0.51a	6.80a	245.89a	3.22a
D2	21.13b	0.63b	7.99b	270.50b	2.64b
D3	20.40c	0.76c	8.94c	272.70b	2.28c
D4	19.96d	0.79c	9.13c	282.90c	2.19c

同列不同小写字母表示在0.05水平上差异显著,下同

收的光照受到影响,净光合速率下降,同时由于气孔导度的升高,导致水分利用效率下降。因此,在小麦密植的种植模式下,需要筛选高光效小麦品种。

2.2 不同密度下叶片光合相关性状的比较 由表2可以看出,小麦的叶绿素含量随着种植密度的增加先升后降,在D2密度下的叶绿素含量最高。当种植密度较低时,小麦的营养体可以充分利用养分和光照进行叶绿素的合成,所以D1和D2密度下叶绿素含量较高。当密度增加后,由于生存的竞争,叶绿

素的合成会受到抑制,所以其含量会出现降低。小麦的旗叶面积和总叶面积与叶绿素含量的变化规律一致,也表现出先增后减的趋势,在D2密度时达到最大值,且与其他处理达到显著差异。D2的旗叶面积比D4高出59.42%,D2的总叶面积比D4高出10.46%。小麦的叶面积指数随密度的增加一直升高,D4的叶面积指数比D1高出30.84%,表明密度对叶面积指数的影响十分明显,对小麦营养体的生长发育和株型的建成产生极大效应。

表2 小麦陕垦224不同密度下的叶片光合相关性状

密度	叶绿素含量	旗叶面积(cm ²)	总叶面积(cm ²)	叶面积指数
D1	55.27a	19.60b	76.82b	3.34
D2	56.70a	22.94a	80.50a	3.67
D3	54.99b	17.55c	76.06b	4.07
D4	53.24b	14.39d	72.88c	4.37

2.3 不同密度下单株和群体的干物质积累量比较

干物质积累量是作物产量的基础,也是反映作物光合能力的最终指标。从表3可以看出小麦单株的干物质积累量与小麦的净光合速率变化一致,随密度的增加一直在下降,两者呈负相关。由于种植密度的增加,小麦的净光合速率在下降,同时单株之间竞争营养供给与光照,生存空间也在变小,所以单株的光合物质积累量降低,D1的单株干物质积累量比D4高出146.87%,D2也比D4高出103.13%。小麦是靠群体来获得生物学产量和经济产量的,在D2密度时,折合群体的干物质积累量达到了最大值(2235.01kg/667m²),然后随着密度的增加,折合群体干物质积累量开始下降。

表3 小麦陕垦224不同密度下的干物质积累量

密度	单株干物质积累量(g)	折合群体干物质积累量(kg/667m ²)
D1	18.12a	1812.32
D2	14.91b	2235.01
D3	9.86c	1978.92
D4	7.34d	1836.25

2.4 不同密度下农艺性状和产量性状的比较

从表4可以看出,小麦的株高随着密度的增加而升高,D3和D4的株高无显著性差异,D4的株高比D1高出5.99%。随着种植密度的增加,小麦之间为了竞争生存空间和接收更多的光照,向上生长明显,因而在一定范围内密度越大,株高也越高。密度对小麦的生长周期影响较小,4个密度水平下陕垦224的全生育期均为218d,同期成熟。

折合有效穗数随密度的增加表现为先升后降,在D3水平时折合有效穗数最大,D3比D1高出56.73%。有效穗数由冬前分蘖决定,当密度较低时基本苗越多,有效穗数越大,而当密度提高到某一临界值时,植株的拥挤反而不利于分蘖的形成,因而出现有效穗数下降的现象。穗粒数随小麦密度的增加一直下降,D1的穗粒数比D4高出26.55%。由于密度的增加,单株的光合能力下降,不能给灌浆提供足够的能量,因此出现了穗粒数的下降。千粒重也表现出和穗粒数相同的规律,D1与D2间差异不显著,但均显著高于D3、D4,D1的千粒重比D4显著高出

表4 小麦陕垦224不同密度下的农艺性状和产量性状

密度	株高(cm)	生育周期(d)	折合有效穗数(万穗/667m ²)	穗粒数	千粒重(g)	折合产量(kg/667m ²)
D1	78.5a	218	24.5	49.1a	46.54a	556.32
D2	79.4b	218	30.4	48.2b	45.42a	577.01
D3	82.4c	218	38.4	43.3c	43.60b	577.92
D4	83.2c	218	33.1	38.8d	43.49b	461.25

7.01%，由于密度的增加，穗粒数的形成受阻，种子的发育程度也受到了影响，千粒重下降。

小麦的产量是由有效穗数、穗粒数和千粒重三要素决定的，由于密度的增加，有效穗数增加，而穗粒数和千粒重下降，因此在三者共同作用下，小麦产量随密度的增加表现为先升后降，D2 和 D3 的产量较高，折合产量分别为 577.01kg/667m² 和 577.92kg/667m²，所以陕垦 224 的田间合理种植密度为 15 万~20 万株/667m²。

3 讨论与结论

本试验对不同密度下小麦的光合性状和产量性状等进行了比较分析，以期探究适合陕垦 224 高产的合理密度。从以上分析可以看出，小麦的种植密度对各光合生理指标影响不同。净光合速率和水分利用效率随着密度的增加一直下降，植株个体光合作用逐渐变弱；叶片叶绿素含量、旗叶面积、总叶面积均随着种植密度的增加先升后降，在群体密度为 15 万株/667m² 时达到最高；小麦的单株干物质积累量随着密度增加而下降，而群体干物质积累量则随着密度增加先升后降，也在 15 万株/667m² 时达到最大值。在实际生产中，应根据育种方向和品种自身光合特性选取合理的密度进行种植，才能最大限度地发挥出小麦品种的产量潜力。

小麦的群体结构是决定最终产量的关键，而采取适宜的栽培密度是调节群体结构的重要途径^[15]。作为群体生长的作物，群体光能利用率更能反映其光合能力的强弱，群体干物质积累量是由单株干物质积累量和作物生长密度共同决定的。虽然随着密度的增加，单株干物质积累量一直在下降，但是单位面积上植株个体数量增多，群体的总干物质积累量得到了提高，为作物的高产提供了有力的“库”的保障。当密度超过一定的范围后，作物单株的营养和光照得不到充分保证，群体干物质积累合成则会受到影响，从而影响到最终产量。本研究中，随着密度的增加，有效穗数随着密度增加先升后降，而穗粒数和千粒重则随着密度的增加一直下降。综合农艺性状和产量性状的表现，陕垦 224 小麦的种植密度为 15 万~20 万株/667m² 时较为合适。

有效穗数是由种植密度、分蘖数和分蘖成穗率三者共同决定的。在陕西地区，由于高水肥条件农田较少，因此需要增加小麦播种量。另外，播种期间

经常受华西秋雨影响，造成播期推迟，农民常采用较高的播种密度来弥补晚播的缺点，然而，单纯依靠增加播种密度并不能增加有效穗数。张明伟等^[16] 研究认为，播种密度过大，穗粒数和千粒重下降，对产量的负面影响增大。卢杰等^[17] 研究认为，冬前分蘖强的品种，分蘖成穗率高，结实性好，比春后分蘖强的品种具有明显的优势，但是这些品种对抗寒性要求较高。所以种植密度对有效穗数的影响在很大程度上取决于品种的特点和栽培环境。现代化农业中，倒伏是小麦生产中的重要风险，不仅影响产量，而且增加机械收割成本。随着播种密度的增加，小麦个体的倒伏风险会加重，因此种植密度的选择和品种抗倒性也有很大关系。

适宜的种植密度有利于缓解植株个体和群体之间的矛盾，通过构建合理的群体结构，可以达到增产的目的^[18]。因此，进行小麦种植时既要考虑群体的光能利用率，也要考虑单株个体的光合能力，针对不同的品种和株型探索出合理的密度，通过栽培措施充分发挥其光合生产潜力，从而提高光合同化产物的积累和转化^[19]，促进小麦产量的提高。

参考文献

- [1] 孙建阁, 王倩, 王蕊, 刘喆. 播种方式对陕西小麦群体构建和产量的影响. 安徽农业科学, 2023, 51 (20): 40-42, 85
- [2] 孙建阁, 赵建兴, 杨林. 陕西小麦单产偏低的原因分析与对策建议. 陕西农业科学, 2017, 63 (1): 55-57
- [3] 方宇辉, 华夏, 韩留鹏, 赵明忠, 齐学礼, 董海滨, 胡琳. 非生物胁迫因素对小麦光合作用的影响研究进展. 河南农业科学, 2023, 52 (10): 1-13
- [4] 李成军, 王冰林, 何启伟, 焦自高. 日光温室厚皮甜瓜叶片发育进程中生理生化指标的变化. 中国蔬菜, 2007 (6): 17-20
- [5] 崔晓朋, 郭家选, 刘秀位, 张喜英, 孙宏勇. 不同种植模式对夏玉米光能利用率和产量的影响. 华北农学报, 2013, 28 (5): 231-238
- [6] 吕丽华, 陶洪斌, 夏来坤, 张雅杰, 赵明, 赵久然, 王璞. 不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性. 作物学报, 2008, 34 (3): 447-455
- [7] 骆兰平, 于振文, 王东, 张永丽, 石玉. 土壤水分和种植密度对小麦旗叶光合性能和干物质积累与分配的影响. 作物学报, 2011, 37 (6): 1049-1059
- [8] 薛志伟, 杨春玲, 宋志均, 薛鑫, 周其军, 负超. 安麦 1241 和安麦 9 号群体性状及产量构成对不同密度的响应. 中国种业, 2018 (11): 53-56
- [9] 吴光耀, 邓岳芬, 卢崇恩, 卜宗式, 胥世荣. 谷子生长过程中光合特

(下转第 113 页)

速率均呈单峰曲线变化。

本研究以高粱盛花期形成籽粒为研究对象,在对高粱籽粒灌浆动态的研究中发现高粱中部籽粒干重与开花后天数符合三次增长曲线,这与袁剑平等^[12]、黄光正等^[13]在小麦上的研究结果非常相似,对于高粱穗部不同层次的灌浆研究发现,高粱穗部灌浆不完全同步,这与张强等^[14]在水稻上的部分结果相似。淀粉是高粱籽粒的主要成分,本研究对高粱籽粒淀粉含量测定发现,随着灌浆进行,淀粉含量呈现近似多峰曲线。淀粉含量的极值出现时间与籽粒干物质积累的最大值出现时间不完全重合,在籽粒干物质最大时提前几天收获能兼顾产量和淀粉含量。如果收获过晚会造成9%左右的粒重下降引起减产。

4 结论

在本研究中为了合理预测最佳收获期发现:籽粒含水量和中部籽粒干重符合三次方曲线关系。同一地区不同年份气候条件不同,即使是同一高粱品种,年度间籽粒脱水速度也有差异,但是自然风干条件下的最终籽粒含水量、百粒重相对稳定。生产中可以在灌浆期通过多次取样测量中部籽粒含水量与百粒重数据,结合最终籽粒含水量与百粒重数据构建三次方曲线函数,计算出最大百粒重时的含水量,再利用含水量与灌浆时间的近似线性关系对最佳收获期进行预测。

参考文献

- [1] 卢庆善. 高粱学. 北京:中国农业出版社,2001
- [2] 王树安. 作物栽培学各论. 北京:中国农业出版社,1994
- [3] 柳青山,周福平,梁笃,段冰,李团银. 糯高粱品种主要农艺性状与产量的灰色关联分析. 中国农学通报,2008,24(7): 478-481
- [4] 柯福来,朱凯,邹剑秋. 密度对高粱品种辽杂19群体籽粒灌浆的效应. 作物杂志,2016(5): 141-146
- [5] 葛占宇,马尚耀,成慧娟,严福忠,王立新,张婷,隋虹杰,潘映雪. 不同施氮水平对高粱籽粒淀粉积累规律的影响. 东北农业科学,2016,41(2): 25-29
- [6] 赵文博,张一中,范昕琦,张晓娟,聂萌恩,梁笃,郭琦,杨彬. 10份不同年代山西省主推高粱品种灌浆与脱水速率研究. 中国农学通报,2021,37(33): 15-22
- [7] 郝全军,隋虹杰. 高粱籽粒成熟度与养分积累及发芽的关系. 北方农业学报,2017,45(1): 14-17
- [8] 宁海龙. 田统试验与统计方法. 北京:科学出版社,2019
- [9] 余建英. 数据统计分析与SPSS应用. 北京:人民邮电出版社,2003
- [10] 张德丰. MATLAB R2015b数值计算方法. 北京:清华大学出版社,2017
- [11] 柯福来,朱凯,邹剑秋. 高粱不同胚乳类型籽粒淀粉积累特性研究. 辽宁农业科学,2016(1): 29-31
- [12] 袁剑平,王晨阳,高松洁,李克军,孙秀丽. 小麦最佳收获期形态指标的研究. 河南农业大学学报,1996(4): 17-21
- [13] 黄光正,朱明哲,天士杰,胡瑞法. 百农3217小麦灌浆规律及其影响粒重主要因素的研究. 百泉农专学报,1982(2): 1-8
- [14] 张强,李自超,傅秀林,吴长明,金京花. 不同株穗型水稻超高产品种叶绿素含量变化规律及籽粒灌浆动态研究. 作物学报,2005(9): 1198-1206

(收稿日期:2023-11-20)

(上接第106页)

- 性的变化. 植物生理学报,1982(2): 111-116
- [10] 赵小光,赵鹏涛,翟周平,尚毅,张雅蕾. 陕垦224在黄淮南部麦区适应性分析. 作物研究,2022,36(2): 112-116
 - [11] 李娜娜,李慧,裴艳婷,石玉华,田奇卓,谢连杰,王树亮,刘鑫,徐凤娇. 行株距配置对不同穗型冬小麦品种光合特性及产量结构的影响. 中国农业科学,2010,43(14): 2869-2878
 - [12] 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. 山东农业科学,2023,55(1): 63-68
 - [13] 焦峰,贺海霞,任传军,于立河,翟瑞常. 不同施肥和密度水平对小麦干物质积累及产量的影响. 安徽农学通报,2013,19(8): 28-29,64
 - [14] 马泉,张玉雪,陶源,苏盛楠,李春燕,丁锦峰,朱敏,朱新开,郭文善. 春季不同时期低温对小麦光合特性和粒重形成的影响. 麦类作物学报,2022,42(2): 226-235
 - [15] 杨艳君,王宏富,郭平毅,王玉国,原向阳,邢国芳,邵东红,祁祥,

- 解丽丽,聂萌恩,郭俊,宁娜. 施肥和密度对张杂谷5号光合特性及产量的影响. 植物营养与肥料学报,2013,19(3): 566-576
- [16] 张明伟,王慧,董召娣,丁锦峰,李春燕,朱新开,封超年,郭文善. 扬麦系列品种植株抗倒性能的演变及与茎秆性状的关系. 麦类作物学报,2016,36(9): 1199-1208
 - [17] 卢杰,董连生,常成,司红起,马传喜. 种植密度对不同小麦品种产量构成及抗倒伏性的影响. 麦类作物学报,2021,41(1): 81-87
 - [18] 赵小光,张耀文,陈文杰,张雅蕾,王竹云,赵兴忠,侯君利,王丽萍,张新. 不同种植密度下甘蓝型油菜光合生理特性的差异. 西南农业学报,2019,32(7): 1531-1536
 - [19] 张耀文,赵小光,关周博,王学芳,侯君利,董育红,田建华,李殿荣,卢庆陶,卢从明. 油菜高光效育种的难点及解决策略. 西北农业学报,2018,27(1): 1-9

(收稿日期:2023-11-15)