

# 等深匀播通过优化小麦冠层结构提高光能利用和产量

何开潇<sup>1</sup>, 尹宝重<sup>2</sup>, 甄文超<sup>1</sup>

(1. 河北农业大学农学院;

2. 河北农业大学植物保护学院)

**摘要:** 为探究等深匀播与播期互作对冬小麦冠层构建、光能分布利用及产量形成的影响。本研究于2023-2025年在河北农业大学辛集试验站设置裂区试验, 行距配置为主区, 分别为常规15 cm行距条播(15RS)、7.5 cm行距条播(7.5RS)和等深匀播(UDS)三种行距配置处理; 播期为副区, 设置了适播、适期晚播和晚播三个播期(分别记为SD1、SD2和SD3)。与7.5RS和15RS相比, UDS上层的FIPAR降低6.72%, 而在中层和下层分别高15.03%和20.28%。这主要归因于早期冠层结构的改善, 包括冠层均匀度、冠层遮荫率的协调分布和叶面积指数的增加(7.87%), 以及后期维持冠层覆盖度及延缓叶片衰老带来的PN提升(14.30%)。最终穗数、每穗粒数和千粒重分别增加4.48%、4.09%和1.66%, 产量提升12.80%( $P<0.05$ )。等深匀播结合适期晚播(SD2-UDS)可改善中下层光环境改善, 最终实现小麦产量提升, 可为黄淮海麦区适期晚播高产栽培提供可推广的冠层结构优化范式和技术支撑。

**关键词:** 冬小麦; 等深匀播; 冠层; 光能利用; 产量

**中图分类号:** S512.1

## Uniform deep sowing improves light energy utilization and yield by optimizing the wheat canopy structure

He Kaixiao<sup>1</sup>, Yin Baozhong<sup>2</sup>, Zhen Wenchao<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Hebei Agricultural University;

2. College of Plant Protection, Hebei Agricultural University)

**Abstract:** To investigate the effects of uniform seeding depth and sowing date interactions on winter wheat canopy structure, photosynthetic energy distribution and utilization, and yield formation. This study employed split-plot design at the Xinji Experimental Station of Hebei Agricultural University from 2023 to 2025. Row spacing was configured in the main plot with three treatments: conventional 15 cm row spacing (15RS), 7.5 cm row spacing (7.5RS), and uniform depth seeding (UDS). Sowing dates were the subplot design, with three treatments: optimal sowing (SD1), optimal late sowing (SD2), and late sowing (SD3). Compared with 7.5RS and 15RS, FIPAR decreased by 6.72% in the upper canopy layer under UDS, while it increased by 15.03% and 20.28% in the middle and lower layers, respectively. This primarily resulted from improved early-stage canopy structure, including enhanced canopy uniformity, coordinated distribution of canopy shading, and increased leaf area index (7.87%). Additionally, sustained canopy coverage and delayed leaf senescence in later stages contributed to a 14.30% increase in photosynthetic net flux (PN). Final spike number, grains per spike, and thousand-grain weight increased by 4.48%, 4.09%, and 1.66%, respectively, with a 12.80% yield increase ( $P<0.05$ ). The combination of uniform seeding at equal depth with optimal late sowing (SD2-UDS) improves the light environment in the middle and lower canopy layers, ultimately boosting wheat yield. This approach provides a scalable canopy structure optimization model and technical support for high-yield cultivation through optimal late sowing in the Huang-Huai-Hai wheat region.

**Key words:** winter wheat; uniform seeding at equal depths; canopy; photosynthetic energy utilization; yield

**作者简介:** 何开潇 (2000-), 女, 主要研究方向: 小麦栽培生理

**通信联系人:** 甄文超 (1969-), 男, 教授、博导, 主要研究方向: 作物节水抗逆. E-mail: wenchao@hebau.edu.cn

## 45 0 引言

小麦作为全球广泛种植的主要粮食作物之一,其高产与稳产对保障世界粮食安全具有重要意义<sup>[1]</sup>。在农业生产水平持续提升的背景下,研究重点正转向如何通过提高作物自身资源利用效率,特别是光能的利用,以进一步探索增产潜力<sup>[2]</sup>。

50 光作为作物生长发育的关键环境因子,在净初级生产力中起着重要作用<sup>[3,4]</sup>。光的可利用性取决于植株群体的空间分布,尤其是冠层结构<sup>[5]</sup>。然而由于作物冠层结构的复杂性,光照在冠层内部分布不均,导致不同层次叶片所处的光环境差异显著,最终制约产量形成<sup>[4,6]</sup>。因此,高产小麦的关键在于构建合理的群体结构<sup>[7]</sup>。播种方式作为农业可持续发展的关键因子,通过调控植株空间分布,直接决定冠层光能截获与光合产物分配,行距配置则是优化冠层光分布的核心栽培措施<sup>[8]</sup>。

55 传统条播在当前高产、高效、绿色农业发展背景下,其冠层调控能力差、资源利用效率低、抗逆性弱等弊端日益凸显<sup>[9,10]</sup>。相比之下,宽幅精播、带状播种、精量穴播等新型播种方式正逐步替代传统条播,以实现更高产、更稳产的目标<sup>[11,12]</sup>。等深匀播技术作为新型播种方式,实现了种子在三维空间的均匀分布,显著改善出苗整齐度和冠层结构<sup>[13]</sup>。作物发育会导致光分布的差异<sup>[4]</sup>,在生长的冠层中,冠层结构(叶面积指数(LAI)和冠层覆盖度(CCP))  
60 是影响叶片收集光和进行光合作用能力的重要因素<sup>[7,14]</sup>。作物产量不仅受遗传与栽培措施影响,还与气候变化密切相,调整播期作为应对气候变化的重要策略,对保障冬小麦稳产具有重要作用<sup>[15]</sup>。播期变化会影响小麦分蘖能力、光能利用及群体构建<sup>[16,17]</sup>。本研究以马兰一号冬小麦为供试材料,设置不同行距配置和播期,探讨二者协同对小麦冠层结构、光能利用及产量的影响,旨在为小麦高产栽培提供理论依据。

## 65 1 材料与amp;方法

## 1.1. 试验地概况

70 试验于2023年10月至2025年6月在河北农业大学辛集试验站(37°99'N, 115°20'E)进行。试验田土壤类型为潮褐土,耕层(0~20 cm)基础理化性质:有机质 18.7 g kg<sup>-1</sup>、全氮 1.25 g kg<sup>-1</sup>、碱解氮 116.8 mg kg<sup>-1</sup>、速效磷 24.4 mg kg<sup>-1</sup>、速效钾 122.5 mg kg<sup>-1</sup>, pH 7.4。前茬作物为夏玉米(郑单 958),秸秆全量粉碎还田。2023-2025年两生长季降水与气温情况如下(图1)。

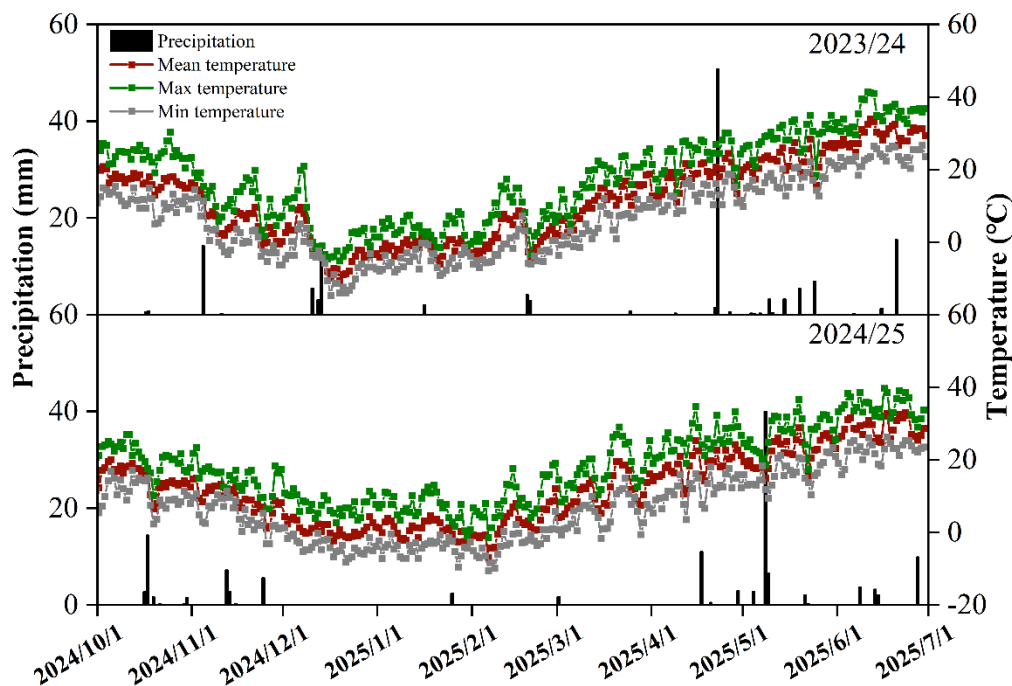


图 1 两生长季节的降雨量和气温

### 1.2. 试验设计

75 试验采用裂区设计，设等深匀播（UDS）、7.5 cm 行距（7.5 RS）和 15 cm 行距（15 RS）3 种行距配置；适播（SD1）、适期晚播（SD2）、晚播（SD3）3 种播期处理。供试品种为冬小麦品种“马兰一号”。试验地由 9 个地块组成，每处理地块面积为 560.0 m<sup>2</sup> (5.6 m×100.0 m)。试验场地实行麦玉轮作制度。前茬夏玉米收获后，秸秆粉碎还田，UDS 采用等深匀播机（2BGY-280）播种，可一次完成旋耕、镇压、施肥和播种。7.5 RS 和 15 RS 采用旋耕机（1GQN-230B）作业 2 遍，机播后镇压（图 2）。小麦播前造墒，底肥施纯氮 120 kg hm<sup>-2</sup>，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 112.5 kg hm<sup>-2</sup>，K<sub>2</sub>O 112.5 kg hm<sup>-2</sup>，春季随灌水追施纯氮 120 kg hm<sup>-2</sup>。小麦分别于 2023 年 10 月 07 日、10 月 14 日、年 10 月 21 日和 2024 年 10 月 10 日、10 月 17 日和 10 月 24 日播种，次年分别于 2024 年 6 月 09 日和 2025 年 6 月 12 日收获。

80

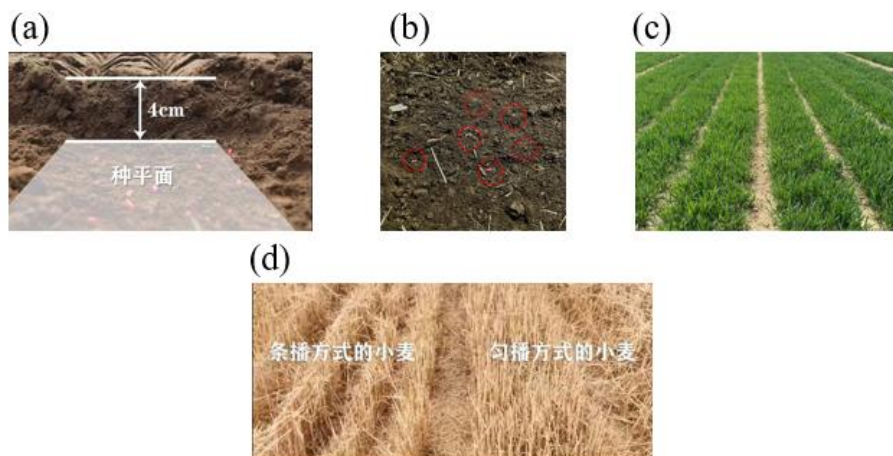


图 2 等深匀播（UDS）播种及条播示意图

85 注：(a)为等深匀播播种深度示意图；(b)为等深匀播种间间距示意图；(c)为等深匀播群体生长示意图；(d)为等深匀播与传统条播对比示意图。

### 1.3.测定内容与方法

#### 1.3.1.冠层均匀度

90 于开花期 (Anthesis Stage,AS) 每处理地块选择具有代表性的冬小麦植株, 通过等高垂直拍照, 记录单株叶片原始分布状态, 并测定不同叶位叶片的角度及长、宽, 计算单株各象限叶面积占比为冠层均匀度 (Canopy Uniformity,CU)。

#### 1.3.2.叶面积指数及覆盖率

95 于开花前期、开花中期 (Mid Anthesis Stage,MS) 和开花末期 (Late Anthesis Stage,LS), 每处理选取 3 块代表性微区, 采用冠层分析仪 (LP-80, 美国), 测定冬小麦群体上、中和下三个叶层叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI)。其中近地面 3 cm~1/3 株高为下层 (Bottom)、1/3~2/3 株高为中层 (Middle)、2/3 株高及以上为上层 (Top)。

100 使用图像分析软件 (Image J,ver1.52a) 对通过智能手机 (Iphone 14 pro max, Apple Inc., Corporation) 在麦田上方 1 m 等高垂直拍摄的图像, 计算麦田冠层覆盖率 (Canopy Cover Percentage, CCP), 使用 RGB 阈值法对图像进行二值化, 以区分小麦和空隙, 并根据二值化图像计算面积。

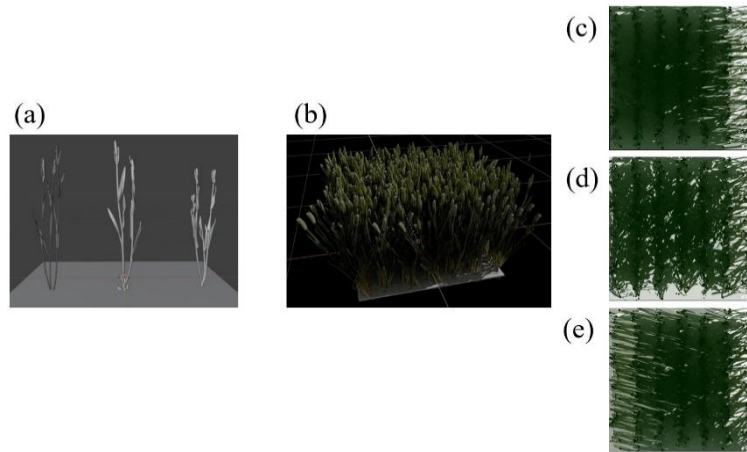
#### 1.3.3 遮荫率及截光率

105 于开花期每处理随机选取 3 株冬小麦植株拍照, 获取植株形态, 采用 Blender 的几何节点功能, 构建小麦种植模型。创建规则网格作为小麦种植点, 再通过集合信息和实例化节点将小麦模型布置到每个网格点, 并随机设置其旋转角度。结合 SketchUp 获取日照信息, 导入 Blender 设置光照。视角固定在正顶面进行阴影渲染, 得到渲染图像后用 Adobe Photoshop 分析阴影面积占比, 计算遮荫率 (Canopy Shading Ratio,CSR) (图 3)。

110 于花后 0d 开始, 之后每隔 10d, 选择代表性微区, 采用冠层分析仪, 在小麦冠层的不同高度间, 测定微区内光合有效辐射 (Photosynthetically Active Radiation,PAR), 并计算截光率 FIPAR。于晴天上午 9:00-12:00 测量。FIPAR 的计算公式如下:

$$\text{FIPAR} (\%) = (\text{PAR}_n - \text{PAR}_{n-1}) / \text{PART} \times 100$$

其中 FIPAR 为被拦截光的百分比,  $\text{PAR}_n$ 、 $\text{PAR}_{n-1}$  和 PART 分别为冠层 PAR、下一高度冠层 PAR 和冠层顶部 PAR。



115

图3 麦田遮荫率模拟示意图

注：(a)为单株模型示意图；(b)为一平方米麦田群体示意图；(c)、(d)、(e)分别为8时、12时、18时群体遮荫示意图。

### 1.3.4.净光合速率

120

于开花期（记为花后0d），之后每隔7d，采用光合仪（Li-6800，美国）测定一次净光合速率（ $P_N$ ），共测5次。每处理选取植株5株，在晴天上午9:00~12:00内，测定旗叶（FL）、倒二叶（SL）和倒三叶（TL）的 $P_N$ 。

### 1.3.5.产量及其构成

125

于成熟期，每处理随机选择3个1.0 m<sup>2</sup>，测定单位面积穗数（SN），选择有效小穗15个（穗粒数≥5粒）测定穗粒数（GS），收获全部植株脱粒后自然干燥至含水量的13%，随机选取1000粒测定千粒重（GW）和实际产量（GY）。

## 1.4 统计分析

130

数据采用MS Excel 2019软件进行初步分析和表格制作，采用SPSS 26.0(IBM, NY, USA)进行方差分析（ANOVA）、差异显著性检验（ $p < 0.05$ ），Mantel测试和偏最小二乘路径建模（PLS-PM）在RStudio（Ross Ihaka and Robert Gentleman, USA）中进行，所有数据均使用Origin 2021（Northampton, MA, USA）进行可视化。

## 2 结果分析

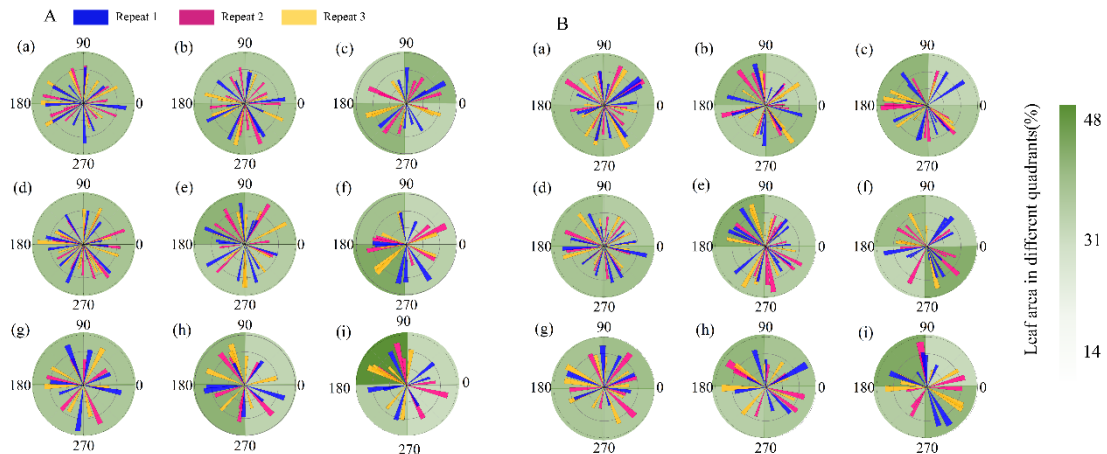
### 2.1 冠层均匀度

135

2023/24生长季小麦冠层均匀度（CU）受行距配置（RS）与播期（SD）影响显著（ $P < 0.01$ ），而2024/25生长季仅对SD响应显著（ $P < 0.05$ ）；两生长季中SD与RS的交互效应均不显著（表1）。由图4可知，等深匀播（UDS）和7.5 cm行距（7.5RS）CU明显优于15 cm行距（15RS）。两生长季平均来看，UDS的CU仅为3.89（2023/24生长季）和5.52（2024/25生长季），7.5RS为14.86和15.43，而15RS高达32.27和20.62。因此，较小行

距处理 (UDS 和 7.5RS) 显著提高了冠层叶片水平分布的均匀度, 其中 UDS 效果最佳, 7.5RS 次之, 15RS 最弱。

140 两个生长季间, 15RS 差异较大, 其占比上下限均发生明显变化, 极差变化幅度波动为 1.19%-10.46%。而 UDS 和 7.5RS 的极差变化幅度波动均小于 2%。各个处理在不同象限间叶面积分布存在一定差异, 第二象限叶面积占比最大 (27.83%), 较最小的第一象限 (21.98%) 相对提高 26.62%, 较第三 (26.40%)、第四 (23.79%) 象限分别提升 5.42% 和 16.98%。



145 图 4 2023/24 和 2024/25 两生长季不同行距配置对冬小麦冠层均匀度的影响

注: A、B 分别为 2023/24 和 2024/25 两生长季; a、b 和 c 分别为适播等深匀播 (SD1-UDS)、7.5 cm 等行距 (SD1-7.5RS) 和 15 cm 等行距 (SD1-15RS); d、e 和 f 分别为适期晚播等深匀播 (SD2-UDS)、7.5 cm 等行距 (SD2-7.5RS) 和 15 cm 等行距 (SD2-15RS); g、h、i 别为晚播等深匀播 (SD3-UDS)、7.5 cm 等行距 (SD3-7.5RS) 和 15 cm 等行距 (SD3-15RS)。

150 表 1 2023/24 和 2024/25 两生长季不同播期、行距配置及其相互作用对冬小麦冠层结构和光能利用的相关性分析

Analysis of variance	CU	LAI	CCP	FIPAR	P <sub>N</sub>	CSR
2023/24						
Sowing date(SD)	21.2**	33.0**	7.9*	53.3**	475.9**	
Row space(RS)	11.1**	14.4**	7.5*	25.5**	190.4**	
SD×RS	1.6ns	0.2ns	0.1ns	0.3ns	1.5ns	
2024/25						
Sowing date(SD)	1.6ns	360.3**	21.2**	122.6**	85.2**	3.2ns
Row space(RS)	4.7*	113.9**	4.8*	44.3**	33.8**	1.0ns
SD×RS	0.75ns	1.4ns	0.2ns	2.1ns	0.4ns	2.1ns

注: CU 为冠层均匀度, LAI 为叶面积指数, FIPAR 为截光率, P<sub>N</sub> 为净光合速率, CSR 为遮荫率。数值为 F 值和显著性水平 (\*\* P<0.01、\* P<0.05 和 ns P≥0.05)。

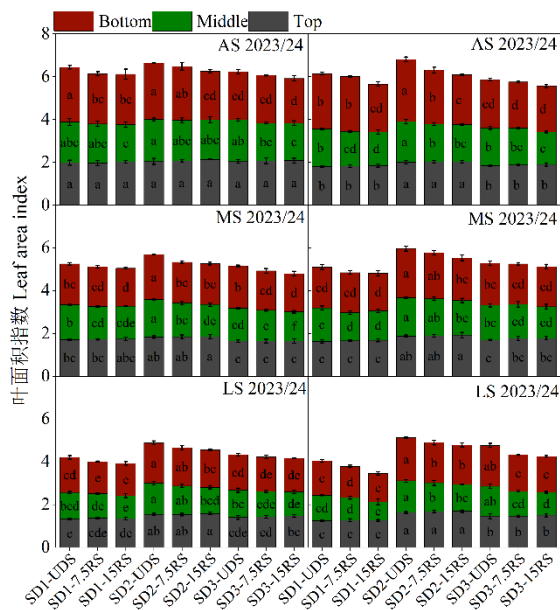
## 155 2.2 叶面积指数

2023/24 与 2024/25 两个生长季中, 播期 (SD) 与行距配置 (RS) 均显著影响冬小麦花后叶面积指数 (LAI) (P<0.05) (表 1)。由图 5 可知, LAI 随花后生育进程持续下降, 且同一时期不同叶层间 LAI 表现为下层大于上层大于中层。等深匀播和 7.5 cm 等行距 (UDS 和 7.5RS) 整体维持较高 LAI, 三播期两年均值较传统条播处理 (15RS) 别提高 7.72% 和 3.17%, 且 UDS 较 7.5RS 提高 4.41%。其中, 上层 LAI 仍以 15RS 略占优势, 较 7.5RS 和

160

UDS 分别高 1.16%、2.34%，而中、下层 LAI 随行距缩小而显著提高，中层 UDS 较 7.5RS 和 15RS 分别提高 8.00%和 14.08%，下层分别提高 6.03%和 11.05%；开花期（AS）、开花中期（MS）和开花末期（LS）均呈此规律。

播期方面，AS 期总 LAI 表现为适期晚播（SD2）大于适播（SD1）大于晚播（SD3），至 LS 期转为 SD2 大于 SD3 大于 SD1。SD2 对 LAI 整体表现为促进作用，总 LAI 较 SD1 和 SD3 分别提高 12.20%和 10.00%，其中上、中、下层增幅分别为 12.88%、12.50%、9.84%和 7.60%、9.46%、10.42%（三行距两生长季均值）。综上，适期晚播与等深匀播(SD2-UDS)协同可最大程度维持花后 LAI，较传统条播（SD1-15RS）高 21.62%。

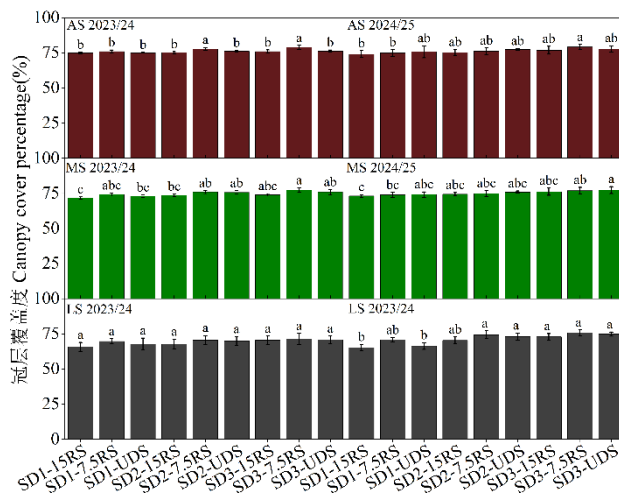


170 图 5 2023/24 和 2024/25 两生长季不同行距配置对冬小麦花后叶面积指数的影响  
注：AS、MS 和 LS 分别为开花期、开花中期和开花末期。

### 2.3 冠层覆盖度

覆盖度（CCP）在 2023/24 和 2024/25 两个生长季均受播期（SD）和行距配置（RS）的调控显著（ $P < 0.05$ ）（表 1）。由图 6 可知，CCP 随生育进程推进持续下降，开花末期（LS）降幅最大，分别较开花期（AS）和开花中期（MS）降低 7.69%和 5.99%。行距配置方面，7.5 cm 等行距（7.5RS）的 CCP 较高，在 AS、MS 和 LS 三个时期分别较等深匀播（UDS）高 1.00%、0.24%和 2.24%，比 15 cm 等行距（15RS）高 2.38%、2.23%和 4.84%，但差异均未达显著水平。

播期效应更为突出，晚播（SD3）在三个时期均维持着最高的 CCP，AS、MS 和 LS 分别较适期晚播（SD2）高 1.49%、1.64%和 2.41%，较适播（SD1）高 3.16%、4.02%和 7.58%；SD3 与 SD2 间差异较小，而与 SD1 差异随生育进程逐渐拉大。综合两生长季结果显示，SD2-UDS 处理 CCP 最佳，较最低处理 SD1-15RS（传统种植方式）提高 5.52%，而较最高处理 SD3-7.5RS 低 2.47%。



185 图 6 2023/24 和 2024/25 两生长季不同行距配置对冬小麦花后冠层覆盖度的影响  
注：AS、MS 和 LS 分别为开花期、开花中期和开花末期。

### 2.4 截光率

2023/24 与 2024/25 两个生长季中，冬小麦的截光率（FIPAR）均受播期（SD）和行距配置（RS）的显著影响（ $P < 0.01$ ）（表 1）。由图 7 可知，FIPAR 随生育进程推进持续下降，各叶层（上、中和下）趋势一致。行距配置中，等深匀播（UDS）对 FIPAR 总体表现为促进作用，两生长季均值表现为 UDS 大于 7.5 cm 等行距（7.5RS）大于 15 cm 等行距（15RS），增幅分别为 2.28% 和 4.33%。分层来看，上层 FIPAR 以 15RS 最高，较 UDS 和 7.5RS 分别高 5.81% 和 2.70%；中、下层则呈相反趋势，UDS 较 15RS 分别提高 15.60% 和 22.29%，较 7.5RS 分别提高 7.08%、12.01%（两生长季三播期平均值）。

195 播期方面，FIPAR 总体表现为适期晚播（SD2）高于适播（SD1）高于晚播（SD3），增幅分别为 2.57% 和 6.80%。具体分层来看，上层表现为 SD2 大于 SD3 大于 SD1，增幅分别为 0.60% 和 1.47%；中、下层表现为 SD2 大于 SD1 大于 SD3，增幅分别为 3.73%、15.84% 和 4.29%、13.98%（两生长季平均值）。进一步分析，行距配置对 FIPAR 的调控幅度大于播期，且优势集中在中下层。SD2-UDS 处理中、下层 FIPAR 分别比传统条播处理（SD1-15RS）提高 22.70% 和 25.87%，是总 FIPAR 显著提升的主因。

200

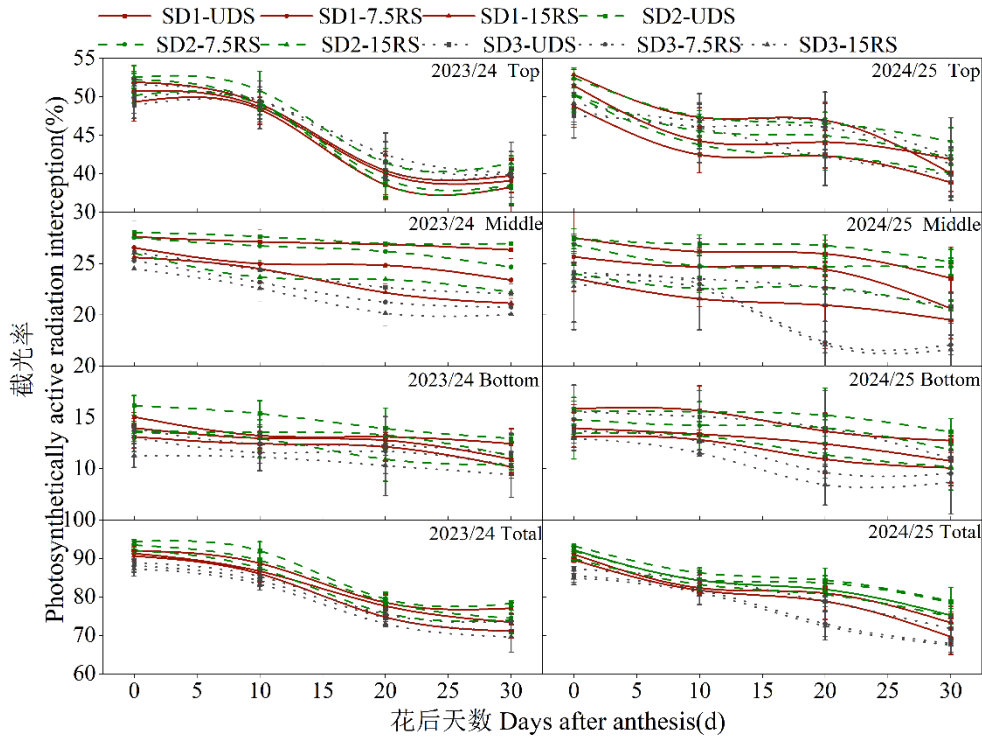


图 7 2023/24 和 2024/25 两生长季不同行距配置对冬小麦花后截光率的影响

注：SD1-UDS、SD1-7.5RS、SD1-15RS、SD2-UDS、SD2-7.5RS、SD2-15RS、SD3-UDS、SD3-7.5RS 和 SD3-15RS 分别为适播等深匀播、适播 7.5 cm 等行距、适播 15 cm 等行距、适期晚播等深匀播、适期晚播 7.5 cm 等行距、适期晚播 15 cm 等行距、晚播等深匀播、晚播 7.5 cm 等行距和晚播 15 cm 等行距。

205

### 2.5 净光合速率

由图 8 可知，随着生育进程的推进净光合速率 ( $P_N$ ) 总体呈递减趋势，但播期效应随花后天数推移而变化，花后 0 d-14 d 表现为适期晚播 (SD2) 大于适播 (SD1) 大于晚播期 (SD3)，至花后 21 d-28 d 则转变为 SD2 大于 SD3 大于 SD1。分不同叶位来看，旗叶 (FL) 和倒二叶 (SL) 均以 SD2 最优，较 SD1 分别提高 14.83% 和 19.97%，较 SD3 分别提高 21.00% 和 28.13%；倒三叶 (TL) 亦呈 SD2 大于 SD3 大于 SD1，增幅分别为 26.74% 与 27.39% (两生长季平均值)。

210

行距配置方面，等深匀播 (UDS) 优于 7.5 cm 等行距 (7.5RS) 和 5 cm 等行距 (15RS) 和，增幅分别为 10.01% 和 15.68%。分不同叶位来看，UDS 使 FL、SL 和 TL 的  $P_N$  分别提高 9.72%、15.43% 和 20.45% (两生长季平均值)。综上，适期晚播搭配等深匀播 (SD2-UDS) 处理最佳，较传统条播 (SD1-15RS) 处理提高 36.65%。2023/24 与 2024/25 两生长季中， $P_N$  均受播期 (SD) 和行距配置 (RS) 的极显著影响 ( $P < 0.01$ ) (表 1)。

215

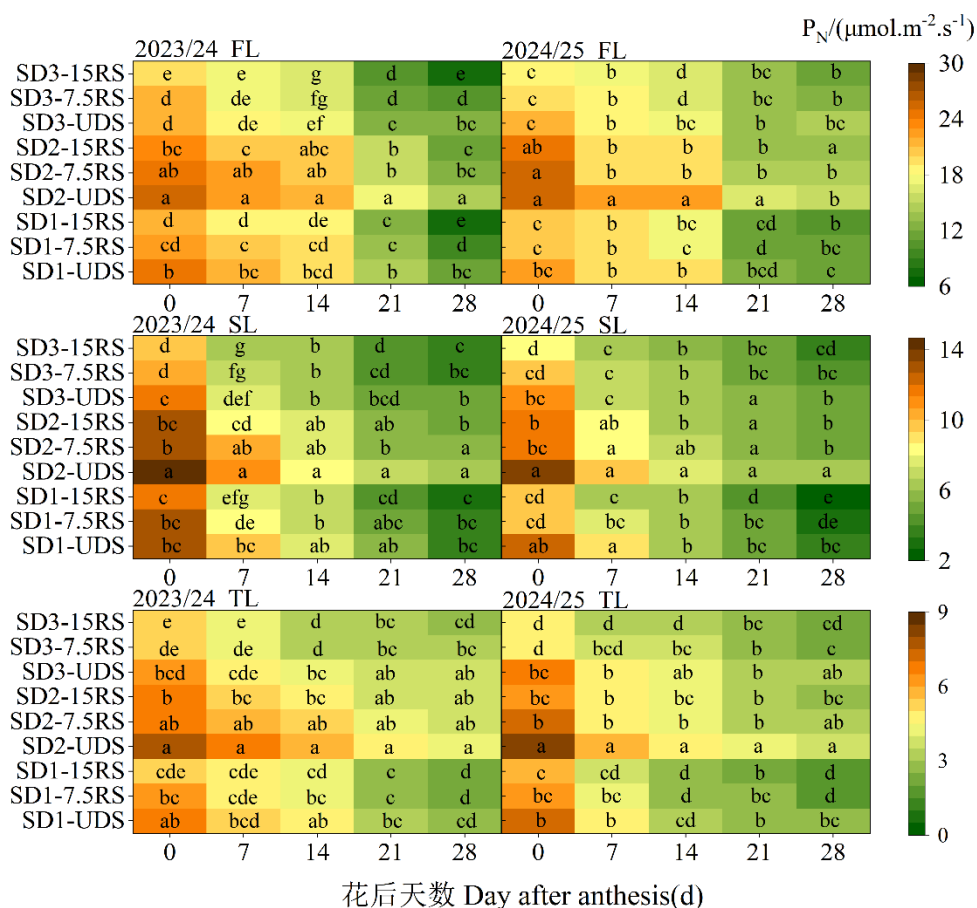


图 8 2023/24 和 2024/25 两生长季不同行距配置对冬小麦花后净光合速率的影响

220 2.6 遮荫率

播期 (SD)、行距配置 (RS) 及其交互作用 (SD×RS) 对冬小麦冠层遮荫率 (CSR) 均无显著影响 ( $P>0.05$ ) (表 1)。如图 9 所示, CSR 随时间的推移不同位置间表现不同, 在麦田两侧呈逐渐降低趋势, 其中 0-10 cm 在 14-18 h 降幅最明显, 较其余时间 (8-13 h) 下降了 53.34%, 较其余位置 (10-90 cm) 下降 52.29%; 而 90-100 cm 一整天内 (8-18 h) 均低于其余位置 (10-90 cm), 降幅为 42.96%。

行距配置方面, UDS 总体上较传统条播 (15RS 和 7.5RS) 有所降低, 降幅为 2.13% 和 1.48%, 分不同位置看, 麦田两侧 (0-20 cm 和 80-100 cm) 表现为 UDS 低于传统条播, 降幅分别为 3.93% 和 7.54%, 而中间部分则表现为 UDS 略高于传统条播, 增幅为 1.72%。播期方面, 随着播期的推迟 CSR 呈先上升后降低的趋势, SD2 较 SD1 和 SD3 分别提高 2.25% 和 3.31%, 不同位置间趋势一致, 且随着时间的推移 SD2 较 SD1 和 SD3 的 CSR 更为均衡, 其中 1600-18 时最为明显。综合来看, SD2-UDS 处理相较于最高的 SD1-15RS 处理 (86.66%) 和最低的 SD3-UDS 处理 (81.29%) 分别提升 5.47% 和降低 0.77%。

230

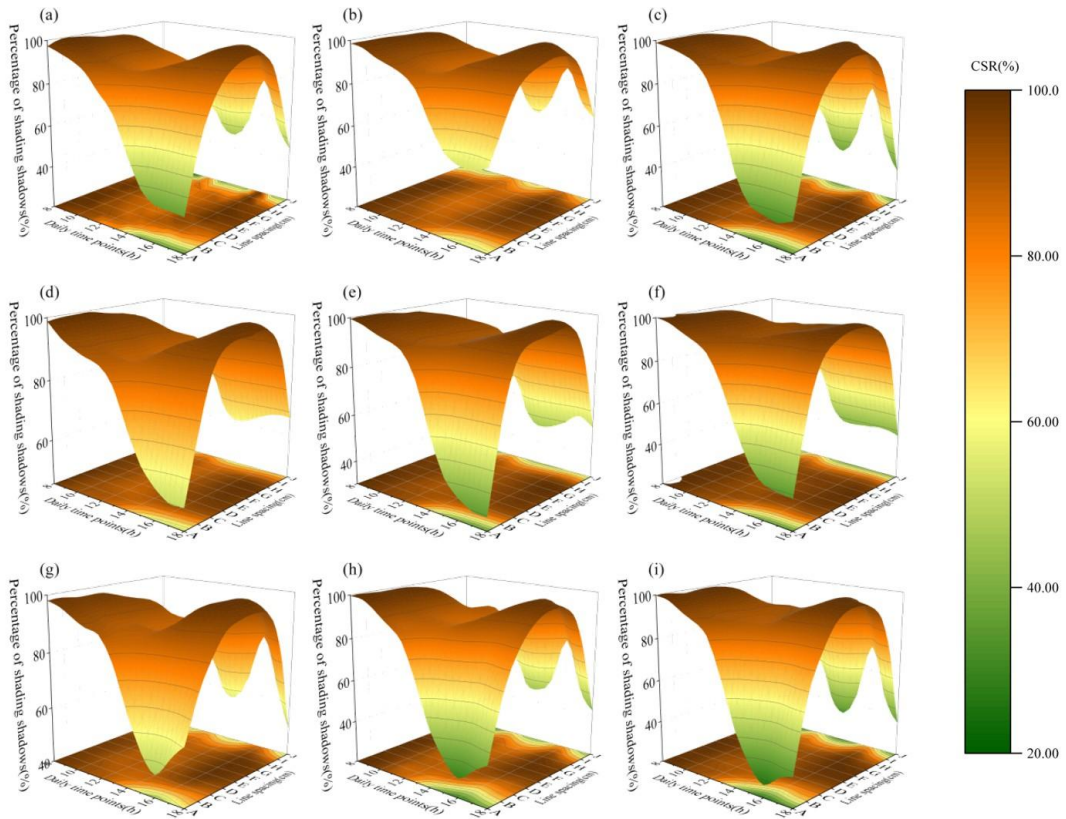


图9 不同行距配置对冬小麦遮荫率的影响

235 注: a-i 分别适播 15 cm 等行距 (SD1-15RS)、适播 7.5 cm 等行距 (SD1-7.5RS)、适播等深匀播 (SD1-UDS)  
 适期晚播 15 cm 等行距 (SD2-15RS)、适期晚播 7.5 cm 等行距 (SD2-7.5RS)、适期晚播等深匀播 (SD2-  
 UDS)、晚播 15 cm 等行距 (SD3-15RS)、晚播 7.5 cm 等行距 (SD3-7.5RS) 和晚播等深匀播 (SD3-UDS)。  
 其中 0-100 cm 行距中每隔 10 cm 划分一次, 依次用 A-J 表示。

### 2.7 产量及其组成

240 从表 2 中的数据可以看出, 等深匀播 (UDS) 显著提高了穗数 (SN) 和穗粒数 (GS), 随  
 着播期的推迟, 千粒重 (GW) 呈上升趋势, 而穗数呈下降趋势。产量 (GY) 总体表现为 UDS  
 和 7.5RS 较 15RS 均存在不同程度的提高, 增幅分别为 5.38% 和 10.63%; SD2 较 SD1 和 SD3  
 分别提高了 6.07% 和 9.71%。其中两年度均以 SD2-UDS 处理最佳, 较其余处理提高 7.04%-  
 19.74% (两生长季平均值)。具体而言, UDS 通过提高 SN 和 GW 来提高 GY, 其中 SN 高  
 245 于 7.5RS 和 15RS 处理 2.03% 和 5.65%, GW 高 1.34% 和 3.96%; SD2 通过提高 GS 来提高产  
 量, 较 7.5RS 和 15RS 增加 1.29% 和 4.63% (两生长季平均值)。

此外, 方差分析显示, SN 受年份 (Y) ( $P < 0.05$ ) 和播期 (SD)、行距配置 (RS) 的  
 显著影响 ( $P < 0.01$ ); GW 受年份 (Y) ( $P < 0.05$ ) 和播期 (SD) ( $P < 0.01$ ) 的显著影响;  
 而 GS 仅受到播期 (SD) 显著影响 ( $P < 0.05$ ); GY 受到播期 (SD) 和行距配置 (RS) 的  
 250 显著影响 ( $P < 0.01$ )。

255

表 2 2023/24 和 2024/25 两生长季不同行距配置下产量及其构成

Year(Y)	Treatment	Spike number(m <sup>2</sup> )	Grain number per spike	1000-grain weight(g)	Grain yield(kg ha <sup>-1</sup> )		
2023-2024	SD1	15RS	682.7 bc	35.5 ab	44.0 b	9339.1 bc	
		7.5RS	726.0 a	35.5 ab	45.1 ab	9850.1 abc	
		UDS	731.7 a	36.7 a	45.6 ab	10281.1 abc	
	SD2	15RS	672.3 c	34.9 ab	45.7 ab	9943.1 abc	
		7.5RS	709.3 ab	36.5 ab	46.6 ab	10439.4 ab	
		UDS	728.7 a	36.7 a	46.7 ab	11322.7 a	
		15RS	667.0 c	33.8 b	47.1 b	8776.0 c	
		7.5RS	686.3 bc	34.8 ab	48.3 a	9301.1 bc	
		UDS	699.0 abc	34.9 ab	49.3 a	9583.7 abc	
	2024-2025	SD1	15RS	703.7 bcd	36.5 a	42.2 b	9094.1 c
			7.5RS	726.3 ab	35.9 a	43.6 ab	9675.7 bc
			UDS	746.3 a	36.1 a	44.4 ab	10257.7 ab
SD2		15RS	690.7 d	36.6 a	43.9 ab	9514.7 bc	
		7.5RS	720.3 abc	36.7 a	45.3 ab	10190.1 ab	
		UDS	741.7 a	37.5 a	46.1 a	10869.7 a	
SD3		15RS	684.7 d	34.67a	45.0 ab	9036.7 c	
		7.5RS	689.7 d	35.00a	46.5 a	9518.4 bc	
		UDS	699.3 cd	35.67a	47.1 a	10015.7 b	
Analysis of variance							
Year(Y)		*	ns	*	ns		
Sowing date(SD)		**	*	**	**		
Row space(RS)		**	ns	ns	**		
Y×SD		ns	ns	ns	ns		
Y×RS		ns	ns	ns	ns		
SD×RS		ns	ns	ns	ns		
Y×SD×RS		ns	ns	ns	ns		

注：“\*”代表在 0.05 水平上有显著差异，“\*\*”代表在 0.01 水平上有显著差异，“ns”代表在 0.05 水平上无显著差异，\*\* $P < 0.01$ ; \* $P < 0.05$ 。

260

## 2.8 综合分析

PLS-PM (GoF=0.589) 表明 (图 10-A)，行距配置对籽粒产量 (-0.101) 有显著的负向影响，播期对籽粒产量 (0.114) 有显著的正向影响，且二者对冠层结构参数 (ST) 和光分布参数 (LD) 均存在负面影响，但未达到显著水平。ST 对籽粒产量 (0.436) 有显著的正向影响，LD 对籽粒产量 (0.402) 有显著的正向影响，同时，ST 对 LD (0.706) 有显著的正向影响。这解释了籽粒产量 ( $R^2=0.669$ )、冠层结构参数 ( $R^2=0.607$ ) 和光分布参数 ( $R^2=0.585$ ) 的大部分方差 (图 5)。

265

Mantel 检验表明 (图 10-B)，播期与冠层结构、光分布和产量参数相关性达到显著水平 ( $p < 0.05$ )，其中与 CU、SN 和 GY 最为密切 ( $p < 0.01$ , Mantel's  $r > 0.2$ )，而与 CSR 无显著关系 ( $p \geq 0.05$ , Mantel's  $r < 0.2$ )；同样，行距配置与这些指标 (LAI、CCP、FIPAR、SN 和 GW) 极显著相关 ( $p < 0.01$ )，尽管有些性状具有中度显著性 ( $P_N$ ,  $0.01 < p \leq 0.05$ )。这些发现表明，播期和行距配置对冠层结构、光能利用和产量具有协同控制作用。Spearman 相关矩阵进一步显示，籽粒产量 (GY) 仅与 CCP 呈显著负相关 ( $p < 0.05$ )，与其余参数均呈正相关，其中与 CU、LAI、FIPAR、 $P_N$  和 SN 呈强正相关 ( $p < 0.01$ )。

270

275

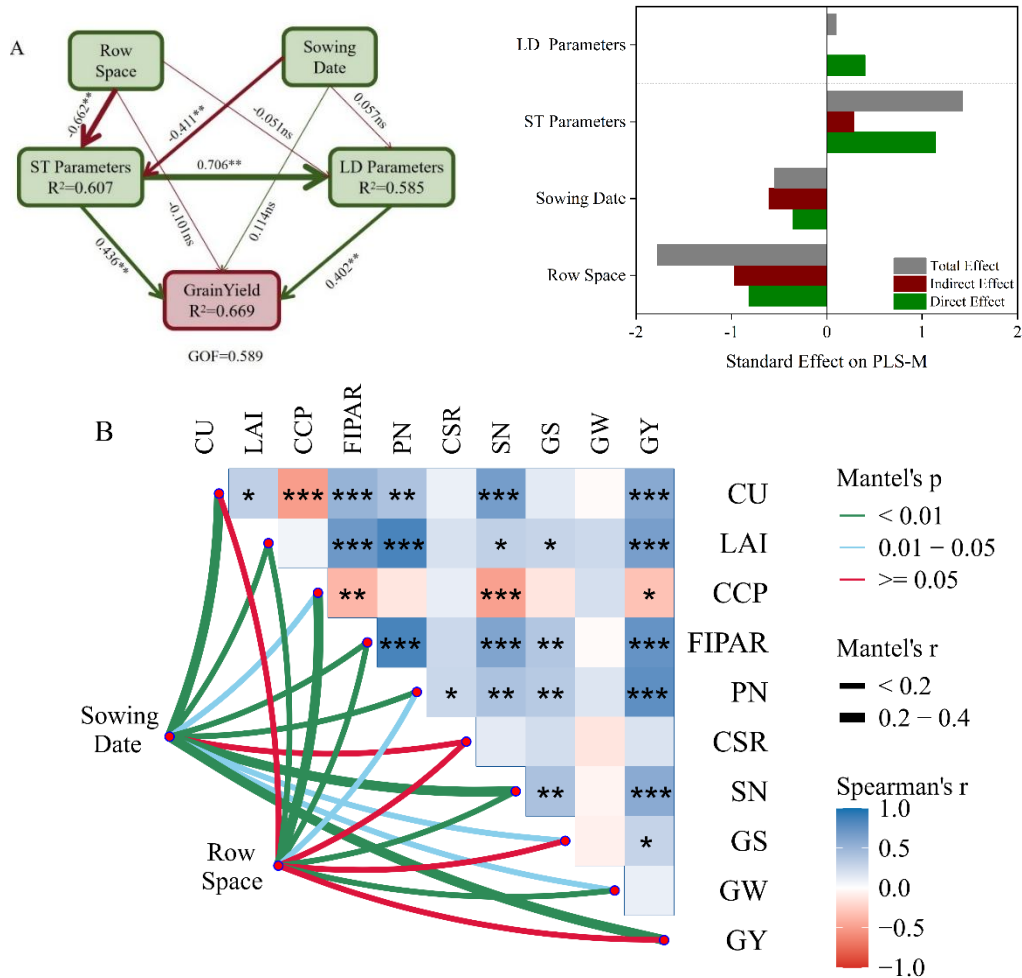


图 10 行距配置和播期对冬小麦冠层结构、光能利用和产量的影响

注：A 为偏最小二乘路径建模（PLS-PM），路径分析结果显示标准化的路径系数，线条颜色表示正负关系和强度（绿色为正，红色为负），拟合优度（GOF）值评估模型性能。统计显著性表示如下：\*， $p < 0.05$ ；\*\*， $p < 0.01$ ；\*\*\*， $p < 0.001$ 。B 为 Mantel 检验和 Pearson 相关矩阵，其中颜色强度表示相关性的强度和方向（蓝色为正，红色为负）。Mantel 的检验结果通过连接线表示：绿线表示高度显著的相关性（ $p < 0.01$ ），蓝线表示中度显著相关性（ $0.01 < p < 0.05$ ）红线表示无显著相关性（ $p \geq 0.05$ ），Mantel 的  $r$  值分为  $< 0.2$ （细线）、 $0.2 - 0.4$ （粗线）。其中 CU 为冠层均匀度，LAI 为叶面积指数 CCP 为冠层覆盖度、FIPAR 为截光率  $P_N$  为净光合速率 CSR 为遮荫率，SN 为穗数、GS 为穗粒数、GW 为千粒重、GY 为产量。

280

285

### 3 讨论

#### 3.1 缩行匀株能均匀叶片分布并优化上密下疏的冠层结构

作物群体的空间分布均匀性是实现高产的重要前提，个体间在水、肥、光、热等资源上的竞争往往会导致群体结构失衡，进而影响整体生产力<sup>[7,18]</sup>。提高群体均匀性有助于优化光能截获效率，促进资源的均衡利用，降低个体之间的竞争强度，是构建高效冠层的重要途径<sup>[7]</sup>。例如：降低播种密度或采用撒播等方式扩大株间距离，可有效改善冠层覆盖率，从而实现增产目标<sup>[19]</sup>。RBP 延缓了小麦生育后期叶片的衰老进程，进一步提升了叶面积指数（LAI）和光截获率（LI），延长了光合作用持续时间，为最终产量的提升奠定了基础<sup>[3]</sup>。这一点在本研究中得到了验证，等深匀播（UDS）通过缩小行距、增大株距，实现了植株空间分布的

290

295 均匀化,使单株植物能够更充分地获取光热、水分和养分等关键生长资源。SD2-UDS 处理  
显著提高了中下层 LAI,有效改善了冠层中下部的光能分布,增强了群体的光能截获能力,  
并在开花末期仍能维持较高的冠层覆盖度(CCP),减缓因叶片早衰导致的株间空隙和行间  
漏光现象。本研究还发现,优化上密下疏的冠层结构有助于优化旗叶的光饱和状态,缓解倒  
300 二叶及以下叶片因光照不足而造成的资源浪费,为提升光能利用效率和产量提供更优条件  
[20,21]。虽然 UDS 未能完全消除象限间的差异,但其显著提高了冠层均匀度(CU),并增强  
了中下层 LAI,延缓了开花末期的 CCP 下降速度,为冠层获取更充足的光能提供了结构基  
础。

### 3.2 等深匀播能优化垂直光分布并提高截光率和净光合速率

行距配置对小麦产量的影响一般归因于光环境的改变,合理的株行距能够优化群体光分  
305 布,增加作物的光合作用强度,进而提高产量[3,22]。遮光程度的差异,可通过相同时期的 LAI  
大小来反应,叶片间遮光时间越长,单位叶面积质量(LMA)就会下降,LMA 对环境变化  
敏感,尤其受光环境的影响[23]。本试验中,UDS 冠层在 Blender 遮光模拟中的 CSR 较 7.5RS  
与 15RS 有所降低,这可能与缓解冠层过度郁闭,减少漏光损失有关。不合理的冠层构造会  
导致透光性失衡,进而降低叶片光合潜能,造成源器官浪费。对于传统条播的小麦群体,主  
310 要问题之一是冠层内部光能穿透能力下降[23]。在截光率(FIPAR)层面,行距配置的调控效  
果显著[3,6],UDS 总 FIPAR 较传统 15RS 存在不同程度的提高,且增量集中于中下层。这归  
因于 UDS 能优化了光能在垂直方向的分配。三维均匀播种(U)模式冠层截获的 FIPAR 高  
于传统条播(D)模式,且在高密度条件下,均匀分布的群体截获了更多的光能,且 FIPAR  
与 LAI 和穗数呈显著正相关[23]。与本研究结果互证:均匀空间分布是提升冠层光截获量  
315 的重要途径。

叶片是作物光合作用的主要器官,其发育状况直接决定产量水平[24]。高光截获必须与高  
光合效率协同才能转化为产量优势[25]。垂直冠层光合能力相关的生理功能性状在冠层中叶  
或上部叶中保持较高的水平,对碳积累和籽粒产量的贡献更大。这主要是因为与较低的叶子  
相比,这些叶子接受到了更多的光照[26]。WSS 播种通过改善群体内部光照条件,使旗叶在  
320 开花后光合特性更优(蒸腾速率、气孔导度和净光合速率均最佳),从而实现高产[9]。UDS  
改善垂直光分布,使旗叶(FL)、倒二叶(SL)、倒三叶(TL)的旗叶净光合速率(P<sub>N</sub>)  
分别较传统条播(15RS)提高,且中下部叶片增幅最大。验证了降低冠层内部光梯度可延缓  
功能叶衰老,并在开花后期最大程度维持光合性能。

### 3.3 等深匀播通过提高穗数和千粒重实现增产

325 冬小麦的产量由穗数、穗粒数和千粒重三个因素共同决定,其最终产量取决于三者的协  
同[8]。实际生产中,合理选择播期与行距配置,小麦产量仍有较大的提升空间[27]。结果显示,  
UDS 较 7.5cm 行距(7.5RS)和 15 cm 行距(15RS)分别增产 5.38%和 10.63%。UDS 不仅  
突显了开发新型播种技术的简洁性,也表明 UDS 在产量提升方面具有显著优势。与常规条  
播相比,三维匀播模式三年平均增幅达 17.39%,较两品种均值提高 10.21%[23]。匀播模式  
330 (BU)连续三年较对照处理(LD)显著提高了冬小麦的籽粒产量[12]。千粒重、穗数均受行  
距配置和播期影响显著。匀播较传统条播分蘖能力更强,最终可能导致穗数的提升,这与植  
株间竞争程度密切相关[17]。适当推迟播期有利于延长籽粒灌浆时间,最终提高千粒重。与冠  
层过密(7.5RS)或过松(15RS)相比,UDS 显著提升了千粒重和穗数,验证了上述结论。  
值得注意的是,过度推迟播种时间则会大幅降低单位面积穗数导致减产[15,28]。U 模式下,作

335 物形成了更优的冠层结构, 表现为更高的穗数和籽粒产量<sup>[23]</sup>。本研究中 SD2-UDS 较常规播种 (SD1-15RS) 相比, 产量增幅远大于单一因素效应, 表现出典型的“1+1>2”协同增益。

相关分析表明, 产量与冠层 CU、LAI 和 FIPAR 呈显著正相关, 这与前人研究结果相似<sup>[23]</sup>。本研究中 Mantel 检验表明, 播期与冠层结构、光分布和产量参数相关性达到显著水平, 其中与 CU、SN 和 GY 最为密切, 同时产量受行距与播期独立显著影响, 交互作用不显著。  
340 综上, SD2-UDS 通过“冠层优化-光能增效-高产增益”的路径, 为冬小麦稳产高产提供参考。

## 4 结论

行距配置是影响小麦产量的重要因素, 因为它影响冬小麦的冠层结构, 而冠层结构的改变会影响到群体光分布及光能利用。冬小麦等深匀播 (UDS) 能构建高光效的冠层结构 (优化冠层均匀度, 提高冬小麦中、下层叶面积指数和平衡冠层覆盖度)。这种结构是提高小麦  
345 光能利用的基础 (与其他的行距配置相比, SD2-UDS 处理冬小麦遮荫率适中, 截光率和净光合更高, 尤其是中、下层叶片)。适期晚播条件下, 采用 UDS 播种技术可实现穗数、穗粒数与千粒重的协同提升, 从而最大化释放产量潜力, 最高可达 11096.22 kg ha<sup>-1</sup>。

### [参考文献] (References)

- 350 [1] Porkka M, Kumm M, Siebert S, et al. From food insufficiency towards trade dependency: a historical analysis of global food availability [J]. PLOS ONE, 2013, 8(12): e82714.
- [2] Han S, Wang C, Zheng Y, et al. The yield and nitrogen use efficiency of winter wheat in the North China Plain could be improved through enhanced tiller formation and biomass transport [J]. Field Crops Research, 2024, 318: 109570.
- 355 [3] Du X, Li Q, Dong T, et al. Winter wheat biomass estimation using high temporal and spatial resolution satellite data combined with a light use efficiency model [J]. Geocarto International, 2015, 30(3): 258-269.
- [4] Wang C, Zhang K, Liu Q, et al. Effects of dense planting patterns on photosynthetic traits of different vertical layers and yield of wheat under different nitrogen rates [J]. The Crop Journal, 2024, 12(2): 594-604.
- [5] Gao Y, Wang Q, Liu Y, et al. Optimal water, nitrogen, and density management increased wheat yield by improving population uniformity [J]. Agricultural Water Management, 2025, 310(c): 109362.
- 360 [6] Li C, Li W, Luo Y, et al. Mixed cropping increases grain yield and lodging resistance by improving the canopy light environment of wheat populations [J]. European Journal of Agronomy, 2023, 147: 126849.
- [7] Yang Y, Li Q, Mu Y, et al. UAV-assisted dynamic monitoring of wheat uniformity toward yield and biomass estimation [J]. Plant Phenomics, 2024, 6(3): 610-620.
- [8] 李世莹, 冯伟, 王永华, 等. 宽幅播种带间距对冬小麦冠层特征及产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(8): 758-767.
- 365 [9] Noor H, Wang Q, Islam M A, et al. Effects of sowing methods and nitrogen rates on photosynthetic characteristics, yield and quality of winter wheat [J]. Photosynthetica, 2021, 59(2): 277-285.
- [10] 赵凯男, 赵辛浩, 姜宗昊, 等. 双镇压精量匀播与氮肥用量对小麦群体结构、籽粒产量及经济效益的影响[J]. 中国农业科学, 2025, 58(18): 3616-3631.
- 370 [11] Gao Y, Zhang M, Yao C, et al. Increasing seeding density under limited irrigation improves crop yield and water productivity of winter wheat by constructing a reasonable population architecture[J]. Agricultural Water Management, 2021, 253: 106951.
- [12] Chen T, Zhu Y, Dong R, et al. Belt uniform sowing pattern boosts yield of different winter wheat cultivars in southwest China[J]. Agriculture, 2021, 11(11): 1077.
- 375 [13] 李刚, 郭丽, 王文国, 等. 小麦等深匀播智能农机装备的研发[J]. 农业机械, 2025, (8): 57-59.
- [14] Shang Q, Wang Y, Tang H, et al. Genetic, hormonal, and environmental control of tillering in wheat[J]. The Crop Journal, 2021, 9(5): 986-991
- [15] Fei L, Chu J, Zhang X, et al. Physiological and Proteomic Analyses Indicate Delayed Sowing Improves Photosynthetic Capacity in Wheat Flag Leaves Under Heat Stress [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 848464.
- 380 [16] Zhu Y, Liu J, Li J, et al. Delayed sowing increased dry matter accumulation during stem elongation in winter wheat by improving photosynthetic yield and nitrogen accumulation[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 151: 127004.
- [17] 刘盼, 高珊, 李浩宇, 等. 缩行匀株对小麦分蘖的影响及其生理机制[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(4): 32-44.
- 385 [18] Tao Z, Ma S, Chang X, et al. Effects of tridimensional uniform sowing on water consumption, nitrogen use, and yield in winter wheat[J]. The Crop Journal, 2019, 7(4): 480-493.

- [19] Mizuta K, Araki H, Takahashi T. Relationship between canopy coverage at the initiation of stem elongation and lodging in wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 148: 126855.
- 390 [20] Zhai M, Wei X, Pan Z, et al. Optimizing plant density and canopy structure to improve light use efficiency and cotton productivity: Two years of field evidence from two locations[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222: 119946.
- [21] Li P, Yin W, Zhao L, et al. No tillage with straw mulching enhanced radiation use efficiency of wheat via optimizing canopy radiation interception and photosynthetic properties[J]. *Field Crops Research*, 2025, 326: 109854.
- 395 [22] Zhang J, Zhang Z, Neng F, et al. Canopy light distribution effects on light use efficiency in wheat and its mechanism[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 1023117.
- [23] Tao Z Q, Wang D M, Ma S K, et al. Light interception and radiation use efficiency response to tridimensional uniform sowing in winter wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(3): 566-578.
- [24] Song K, Hong S, Shim S. Responses of Photosynthetic Activity in Flag Leaves and Spikes as well as Seed Development of Wheat (*Triticum aestivum* L.) to Artificial Shading [J]. *Agronomy*, 2025, 15(11): 2577.
- 400 [25] Zhao F H, Yu G R, Li S G, et al. Canopy water use efficiency of winter wheat in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 93(3): 99-108.
- [26] 费立伟, 代兴龙, 张秀, 等. 花后高温胁迫下晚播对冬小麦灌浆特性和粒重的影响[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(3): 479-488.
- 405 [27] 何璐, 张利茹, 杨若沂, 等. 限水灌溉时期对冬小麦各叶层衰退和群体光合的影响[J]. *华北农学报*, 2023, 38(4): 167-173.
- [28] Chen S Y, Zhang X Y, Mao R Z, et al. Effect of sowing date and rate on canopy intercepted photo-synthetically active radiation and yield of winter wheat [J]. 2009, 17(4): 681-685.