

水平结构配置对冬小麦冠层垂直结构、微环境及产量的影响

熊淑萍¹ 曹文博¹ 曹锐¹ 张志勇¹ 付新露¹ 徐赛俊¹ 潘虎强¹ 王小纯²
马新明^{1*}

¹河南农业大学农学院, 作物生长发育调控教育部重点实验室, 郑州 450046; ²河南农业大学生命科学学院, 郑州 450002

摘要 作物的冠层结构是影响产量的重要因素, 群体微环境反映了作物冠层内小气候的变化, 与作物的冠层结构及产量形成密切相关。该研究在大田试验条件下, 设置等行距(R₁, 20 cm + 20 cm)、宽窄行(R₂, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm)两种不同行距和低(D₁, 120.0 kg·hm⁻²)、中(D₂, 157.5 kg·hm⁻²)、高(D₃, 195.0 kg·hm⁻²) 3个播量配置组合, 分析了不同处理组合下冬小麦(*Triticum aestivum*)生育后期冠层垂直结构、群体微环境及产量表现, 旨在优化小麦绿色栽培措施, 在不增加水肥投入情况下, 挖掘冬小麦的生产潜力和进一步增产的可能性和可行性。结果表明: 冬小麦上、中、下3个层次冠层开度(DIFN)、平均叶倾角(MLA)及叶面积指数(LAI)均表现为R₂大于R₁, 且R₂行距上层和中层DIFN、各层次MLA及LAI显著高于R₁, 在相同行距下, D₃播量LAI下降迅速, D₂播量的LAI及其中层和下层的MLA最高, 并与D₁、D₃差异显著; 冬小麦冠层温度和群体CO₂浓度均随着播量的增大而降低, 而相对湿度随播量增大而增大; 在相同播量下, R₂行距较R₁更具有降温保湿能力, 冠层平均温度较R₁下降了0.06–0.5 °C, 相对湿度较R₁提高了1.85%–3.15%; 在相同播量下, R₂行距千粒质量、穗粒数都显著大于R₁, 因此R₂籽粒产量也显著高于R₁。综上所述, 冬小麦的水平结构配置可显著改变其冠层的垂直结构及群体微环境, 有利于冬小麦生长发育后期籽粒的灌浆, 在不减少穗数的情况下, 提高穗粒数及千粒质量, 从而达到增产目的。在该试验中以R₂D₂配置的冠层结构、群体微环境及产量最佳。

关键词 冬小麦; 水平分布; 冠层垂直结构; 微环境; 产量

熊淑萍, 曹文博, 曹锐, 张志勇, 付新露, 徐赛俊, 潘虎强, 王小纯, 马新明 (2022). 水平结构配置对冬小麦冠层垂直结构、微环境及产量的影响. 植物生态学报, 46, 188-196. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0165

Effects of horizontal structure on canopy vertical structure, microenvironment and yield of *Triticum aestivum*

XIONG Shu-Ping¹, CAO Wen-Bo¹, CAO Rui¹, ZHANG Zhi-Yong¹, FU Xin-Lu¹, XU Sai-Jun¹, PAN Hu-Qiang¹, WANG Xiao-Chun², and MA Xin-Ming^{1*}

¹Key Laboratory of Regulating and Controlling Crop Growth and Development (Ministry of Education), College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; and ²College of Life Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

Abstract

Aims Canopy structure of crops is an important factor affecting crop yield. The microenvironment of a community reflects the change of microclimate in the canopy, which is closely related to the canopy structure and crop yield formation. The aim of this study was to optimize the cultivation measures and improve the production potential and yield of winter wheat (*Triticum aestivum*).

Methods A field experiment was set up to be composed of two row spacing modes, R₁ (equal spacing, 20 cm + 20 cm) and R₂ (wide and narrow row spacing, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm), and three sowing rates, D₁ (low, 120.0 kg·hm⁻²), D₂ (medium, 157.5 kg·hm⁻²), D₃ (high, 195.0 kg·hm⁻²), then the canopy structure, community microenvironment and yield performance of winter wheat under each treatment combination were analyzed.

Important findings For the diffusenon-interceptance (DIFN), mean leaf angle (MLA) and leaf area index (LAI)

收稿日期Received: 2021-04-28 接受日期Accepted: 2021-08-13

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(21A210015)、河南省小麦产业技术体系项目(S2010-01-G04)和国家重点研发计划(2016YFD0300205)。Supported by the Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan Province (21A210015), the Henan Province Modern Agricultural Wheat Industry Technology System Project (S2010-01-G04), and the National Key R&D Program of China (2016YFD0300205).

* 通信作者Corresponding author (xinmingma@126.com)

of each layer of the winter wheat canopy, R_2 was greater than R_1 , especially in the middle and upper layers of the canopy. For the MLA and LAI of each layer, R_2 was mostly significantly greater than R_1 ; Under the same row spacing, the LAI of the high seeding population dropped rapidly, and LAI of the D_2 seeding rate and the middle and lower MLA were significantly higher than the other seeding rates at D_2 . Winter wheat canopy temperature and community CO_2 concentration decreased with the increased sowing rate, while the relative humidity increased with the increased sowing rate; Under the same sowing rate, the row spacing of R_2 had more cooling and moisturizing ability than that of R_1 . The average temperature and relative humidity of the overall canopy decreased by $0.06\text{--}0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and increased by $1.85\%\text{--}3.15\%$ compared with R_1 , respectively. Under the same sowing rate, the 1 000 grain weight and grain number per spike of R_2 were significantly higher than that of R_1 , so the grain yield of R_2 was also significantly higher than that of R_1 . In conclusion, the horizontal distribution of crops can change the vertical structure of canopy and community microenvironment, which is conducive to grain filling in the late growth stage, and increase the number of grains per year and 1 000 grain mass without reducing the number of spikes, so as to achieve the purpose of increasing yield. In this experiment, R_2D_2 was the best configuration for canopy structure, community microenvironment and yield.

Key words *Triticum aestivum*; horizontal distribution; vertical structure of canopy; microenvironment; yield

Xiong SP, Cao WB, Cao R, Zhang ZY, Fu XL, Xu SJ, Pan HQ, Wang XC, Ma XM (2022). Effects of horizontal structure on canopy vertical structure, microenvironment and yield of *Triticum aestivum*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46, 188-196. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0165

小麦(*Triticum aestivum*)是世界上种植面积最广的粮食作物,其产量对全球粮食安全的影响超过其他任何作物(Reynolds *et al.*, 2012),实现小麦高产更高产是永恒的主题。小麦的冠层结构及微环境是影响产量的重要因素,二者共同影响小麦的个体生长发育、生理生态及光合等特性,只有构建合理的冠层结构和群体微环境,才能充分发挥作物的生产潜力(杨文平等, 2008)。作物的冠层结构及微环境不仅受品种(Spielmeyer & Richards, 2004; 李娜娜等, 2010)影响,还受水肥管理(王艺陶等, 2009; 聂胜委等, 2018)和田间水平结构配置(杨文平等, 2008; 李世莹等, 2013; 李静等, 2020)等因素影响。然而,面对当前耕地、水分等有限的资源条件和保护生态环境实现绿色生产的双重问题,依靠进一步扩大耕地面积、增加水肥等资源的投入实现小麦的高产再高产空间已经很小,因此,通过优化作物的田间结构布局、塑造良好的作物群体结构,改善冠层内光、温的分布,实现冬小麦生育期有限资源的高效利用,充分发挥品种的产量潜力,对冬小麦的绿色高产栽培具有重要意义。

作物的田间水平结构是作物群体在田间的横向排列,即作物密度、行数、行株距等因素的组合。杨文平等(2008)认为缩小行距,有利于提高小麦冠层光截获能力和相对湿度,并降低冠层开度和冠层温度,使植株分布及冠层中 CO_2 更均匀分布。薛盈文等(2015)也认为在晚播条件下缩小行距,有利于提

高小麦冠层中上部光截获能力和冠层相对湿度,并降低群体内部最高温度,同时种子均匀分布有利于降低温度,提高湿度和产量。李世莹等(2013)认为在宽幅播种条件下麦田冠层光截获、平均叶倾角、相对湿度、叶面积指数均高于常规条播,而冠层开度和温度低于常规条播,并在带间距为12 cm时,其穗粒数、千粒质量、产量、生物量和收获指数最高。孙淑娟等(2008)认为行株距分布均匀的群体更能显著降低近地面空气温度和增加空气湿度。综上所述,前人关于冬小麦田间水平结构配置与冠层结构及环境关系方面的研究,多集中于行株距或密度的单一因素调整,很少将冬小麦的种植密度、行数及行距等因素全面组合,系统地田间水平结构配置与小麦群体冠层结构、光温环境及籽粒产量之间相互关系及其生态机理进行整体分析。为此,本试验在前期研究(熊淑萍等, 2018, 2021)的基础上,进一步明确在现有水肥管理条件下,有利于冬小麦冠层结构优化和产量提高的田间水平结构配置模式及其生态机制,以期对冬小麦绿色高产栽培提供技术支持与理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于2019–2020年冬小麦生产季,在河南农业大学许昌校区试验田(34.13°N , 113.80°E)进行。试验田土壤为潮土,前茬作物为玉米(*Zea mays*),冬

小麦播种前0–20 cm土层土壤基础养分含量为: 土壤有机质16.32 g·kg⁻¹、全氮1.31 g·kg⁻¹、硝态氮21.54 mg·kg⁻¹、速效磷8.54 mg·kg⁻¹、速效钾324.53 mg·kg⁻¹。

试验采用裂区设计, 主区为2个行距处理, 即20 cm + 20 cm等行距(R₁)处理和12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm宽窄行(R₂)处理, 2种行距具体田间配置模式见图1, 副区为3个播量水平, 设120.0 kg·hm⁻²播量(D₁)、157.5 kg·hm⁻²播量(D₂)、195.0 kg·hm⁻²播量(D₃), 共6个水平结构处理组合, 3次重复。每小区面积为20 m² (4 m × 5 m), 试验小区小麦全生育期施尿素(含N量46%) 489 kg·hm⁻², 过磷酸钙(含P₂O₅ 16%) 656 kg·hm⁻²和氯化钾(折算为K₂O 60%) 175 kg·hm⁻², 分别折合为纯N 225 kg·hm⁻², P₂O₅和K₂O各105 kg·hm⁻²。其中尿素基追比为6:4, 追肥在拔节期配合浇水一次性施入, 磷、钾肥全部在整地时基施, 其他栽培管理均按照常规高产麦田统一进行。供试小麦品种为‘周麦27’, 10月15日播种, 各处理出苗情况见表1。

1.2 测定项目和方法

1.2.1 叶面积指数(LAI)的测定

于开花期, 花后10、20、30天, 采用比质量法测定LAI。

1.2.2 冠层开度(DIFN)和平均叶倾角(MLA)的测定

DIFN代表冠层下可见天空比例, 即未被叶片遮挡的天空, 常用来表示冠层透光率, MLA是指植物叶片与水平方向之间的锐角, 两者均是反映小麦群体冠层光辐射特征的主要指标。

于小麦灌浆期, 使用LAI-2200C冠层分析仪(LI-COR, Lincoln, USA)测定DIFN、MLA。在水平方向, R₁行距配置测定20 cm行间, R₂行距配置分别在24 cm宽行和每4行中第二个窄行测定; 在垂直方向上(如图2所示)分别在小麦上层(旗叶层)、中层(倒二叶层)、下层(距地表5 cm)测定, 仪器自动计算出DIFN、MLA。

1.2.3 冠层CO₂浓度的测定

在灌浆中期, 用CO₂浓度传感器(EE820, E+E, Langwiesen, Austria)测定冠层CO₂浓度, 测定时间为当天7:00–18:00定时(时间间隔1 h)定点连续监测, 测定位置同1.2.2。

1.2.4 冠层空气温度及相对湿度的测定

用温湿度传感器(EE160, E+E, Langwiesen, Austria)测定, 测定时间与方法同1.2.3。

1.2.5 产量及构成要素测定

采用一米双行法进行测定。成熟时收获一米双行, 室内考种, 计算单位面积穗数、穗粒数和千粒质

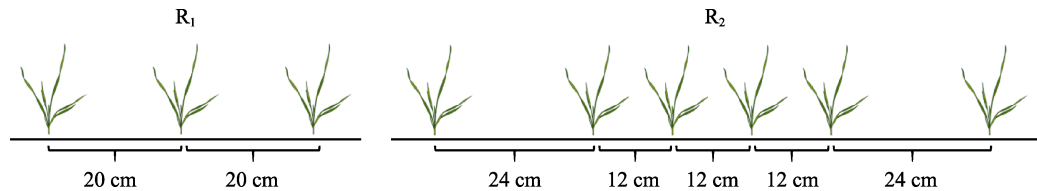


图1 冬小麦不同行距配置(R)田间示意图。

Fig. 1 Field diagram of different row spacing configuration (R) of *Triticum aestivum*.

表1 不同处理冬小麦田间基本苗(平均值±标准差)

Table 1 Basic seedlings of *Triticum aestivum* in different treatment (mean ± SD)

行距配置 Row spacing configuration	播量 Sowing rate (kg·hm ⁻²)	基本苗 Basic seedling (10 ⁴ ·hm ⁻²)
R ₁	120.0	214.95 ± 4.65
	157.5	297.15 ± 6.00
	195.0	365.40 ± 5.85
R ₂	120.0	223.50 ± 8.85
	157.5	291.60 ± 10.65
	195.0	358.35 ± 9.15

R₁, 20 cm + 20 cm行距模式; R₂, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm行距模式。
R₁, 20 cm + 20 cm row spacing model; R₂, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm row spacing model.

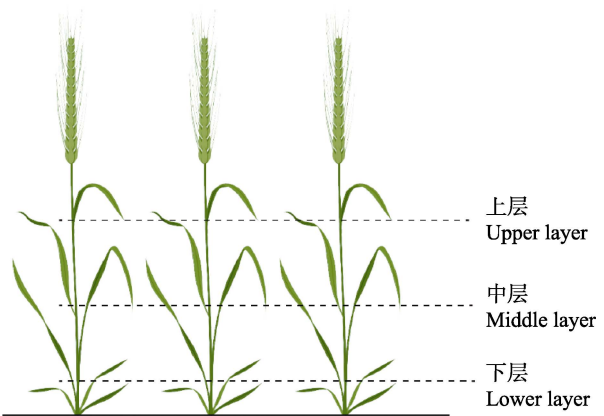


图2 冬小麦冠层分层示意图。

Fig. 2 *Triticum aestivum* canopy stratification diagram.

量,同时测定一米双行全部籽粒干质量,折算单位面积产量。3次重复。

1.3 数据分析

应用SPSS 20对相关数据进行方差分析,处理间差异性采用新复极差法(SSR)计算;利用Microsoft Excel 2016作图。图表中的数据为平均值±标准差。

2 结果和分析

2.1 水平结构配置对冬小麦当层结构的影响

2.1.1 对冬小麦LAI的影响

由图3可知,各处理组合的LAI于开花期以 R_2D_3 处理最大,并随生育时期逐渐降低。在开花期相同行距配置下,冬小麦LAI均表现为随播量增大而增大,而在开花至花后30天, D_3 播量的群体LAI下降迅速,LAI随播量变化表现为 $D_2 > D_3 > D_1$;在相同播量下两行距相比较, R_2 行距配置LAI高于 R_1 处理,且在开花至花后20天行距间差异显著。

2.1.2 对冬小麦DIFN的影响

由表2可知,各处理下DIFN在垂直方向上均表现为上层>中层>下层。在同一行距下,冬小麦各层次的DIFN均随播量增大而降低,在冠层中层、上层各播量间差异显著,在冠层下层, D_1 、 D_2 播量间差异不显著, D_1 、 D_2 和 D_3 播量差异显著;在同一播量下两

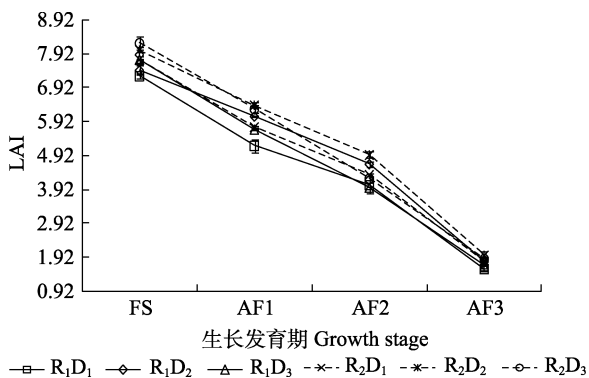


图3 水平结构配置对冬小麦叶面积指数(LAI)的影响(平均值±标准差)。FS, 开花期; AF1, 开花后10天; AF2, 开花后20天; AF3, 开花后30天。 R_1 , 20 cm + 20 cm 行距模式; R_2 , 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm 行距模式。 D_1 , 120.0 kg·hm⁻²播量; D_2 , 157.5 kg·hm⁻²播量; D_3 , 195.0 kg·hm⁻²播量。

Fig. 3 Effect of horizontal configuration on leaf area index (LAI) of *Triticum aestivum* (mean ± SD). FS, anthesis; AF1, 10 days after anthesis; AF2, 20 days after anthesis; AF3, 30 days after anthesis. R_1 , 20 cm + 20 cm row spacing model; R_2 , 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm row spacing model. D_1 , 120.0 kg·hm⁻² sowing rate; D_2 , 157.5 kg·hm⁻² sowing rate; D_3 , 195.0 kg·hm⁻² sowing rate.

行距间比较, DIFN表现为 $R_2 > R_1$, 且随播量变化而表现不同: 在 D_1 播量下, 在冠层上层、中层, 行距间差异显著, 在冠层下层, 行距间差异不显著; 在 D_2 播量下, 在冠层上层、下层, 行距间差异显著, 中层行距间差异不显著; 在 D_3 播量下, 行距间只在冠层中层、下层行距间差异显著($p < 0.05$)。

2.1.3 对冬小麦MLA的影响

由表3可知冬小麦平均叶倾角在垂直方向表现

表2 水平结构配置对冬小麦当层开度的影响(平均值±标准差)

Table 2 Effects of horizontal structure configuration on diffusenon-interceptance of *Triticum aestivum* (mean ± SD)

行距配置 Row spacing configuration	播量 Sowing rate	上层 Upper layer	中层 Middle layer	下层 Lower layer
R_1	D_1	0.282 ± 0.003 ^b	0.122 ± 0.004 ^b	0.038 ± 0.001 ^{ab}
	D_2	0.272 ± 0.001 ^c	0.109 ± 0.002 ^{cd}	0.035 ± 0.003 ^{bc}
	D_3	0.253 ± 0.004 ^d	0.084 ± 0.001 ^f	0.029 ± 0.001 ^d
R_2	D_1	0.312 ± 0.005 ^a	0.129 ± 0.002 ^a	0.041 ± 0.001 ^a
	D_2	0.287 ± 0.001 ^b	0.113 ± 0.002 ^c	0.038 ± 0.001 ^a
	D_3	0.259 ± 0.002 ^d	0.095 ± 0.006 ^e	0.033 ± 0.001 ^c
R	F	86.73 ^{**}	15.32 [*]	15.61 [*]
D	F	167.57 ^{**}	124.99 ^{**}	29.78 ^{**}
R × D	F	13.63 [*]	1.24	0.03

R_1 , 20 cm + 20 cm 行距模式; R_2 , 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm 行距模式。 D_1 , 120.0 kg·hm⁻²播量; D_2 , 157.5 kg·hm⁻²播量; D_3 , 195.0 kg·hm⁻²播量。同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$ 。 R_1 , 20 cm + 20 cm row spacing model; R_2 , 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm row spacing model. D_1 , 120.0 kg·hm⁻² sowing rate; D_2 , 157.5 kg·hm⁻² sowing rate; D_3 , 195.0 kg·hm⁻² sowing rate. Different lowercase letters in the same column mean significant difference at 0.05 level. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

表3 水平结构配置对冬小麦平均叶倾角的影响(平均值±标准差)

Table 3 Effects of horizontal structure configuration on mean leaf angle of *Triticum aestivum* (mean ± SD)

行距配置 Row spacing configuration	播量 Sowing rate	上层 Upper layer	中层 Middle layer	下层 Lower layer
R_1	D_1	65.69 ± 0.45 ^c	58.75 ± 0.18 ^d	53.30 ± 0.43 ^d
	D_2	66.47 ± 0.36 ^b	61.46 ± 0.04 ^b	57.00 ± 0.30 ^b
	D_3	67.71 ± 0.46 ^a	59.50 ± 0.10 ^c	55.42 ± 0.27 ^c
R_2	D_1	66.53 ± 0.03 ^b	59.96 ± 0.09 ^c	54.92 ± 0.20 ^c
	D_2	67.57 ± 0.14 ^a	62.37 ± 0.47 ^a	57.79 ± 0.38 ^a
	D_3	67.63 ± 0.14 ^a	60.95 ± 0.42 ^b	56.80 ± 0.17 ^b
R	F	12.05 ^{**}	56.59 ^{**}	51.39 ^{**}
D	F	25.34 ^{**}	90.23 ^{**}	117.60 ^{**}
R × D	F	3.97 [*]	0.93	1.99

R_1 , 20 cm + 20 cm 行距模式; R_2 , 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm 行距模式。 D_1 , 120.0 kg·hm⁻²播量; D_2 , 157.5 kg·hm⁻²播量; D_3 , 195.0 kg·hm⁻²播量。同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$ 。 R_1 , 20 cm + 20 cm row spacing model; R_2 , 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm row spacing model. D_1 , 120.0 kg·hm⁻² sowing rate; D_2 , 157.5 kg·hm⁻² sowing rate; D_3 , 195.0 kg·hm⁻² sowing rate. Different lowercase letters in the same column mean significant difference at 0.05 level. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

为上层>中层>下层。在同一行距配置下,冬小麦各层次MLA随播量响应不同,在冠层上层,MLA随播量增大而增大,而在中层、下层,MLA随着播量增大呈现先增后降的趋势,均以D₂播量显著高于其余播量;在同一播量水平下,R₂行距配置各层次MLA均高于R₁配置,在D₁、D₂播量下,各层次行距间差异显著;在D₃播量下,上层行距间差异不显著,中层、下层行距间差异显著。

2.2 水平结构配置对小麦冠层群体微环境的影响

2.2.1 对冬小麦冠层温度的影响

麦田冠层温度对籽粒的灌浆具有重要意义,冠层温度降低有利于延长灌浆高峰持续的时间。由图4可知,不同水平结构配置下冬小麦冠层各层次温度变化趋势一致,从7:00冠层温度开始上升,于12:00–13:00冠层温度达到峰值。在垂直方向上,麦田温度呈现中间高,两边低的趋势。在同一行距配置下,冬

小麦冠层各层次的温度均随着播量增大而降低,特别是上层冠层温度受播量变化影响较大;在同一播量水平下,R₂行距配置小麦各层次冠层温度均低于R₁,R₂行距配置冠层平均温度较R₁降低0.06–0.50 °C。

2.2.2 对冬小麦冠层相对湿度的影响

由图5可知,与冬小麦冠层温度变化趋势相反,冬小麦冠层各层次相对湿度变化随时间呈先降低后升高的趋势,在13:00达到最小值。小麦冠层的相对湿度在垂直方向均表现为由上至下逐渐增大,上层的相对湿度最低,且随外界环境变化最大。在同一行距配置下,麦田冠层各层次相对湿度均随着播量增大而增大。在同一播量下,麦田冠层相对湿度R₂行距配置均高于R₁行距配置,R₂配置平均相对湿度较R₁提高了1.85%–3.15%。

2.2.3 对冬小麦冠层CO₂浓度的影响

由图6可知冬小麦冠层CO₂浓度在垂直方向表

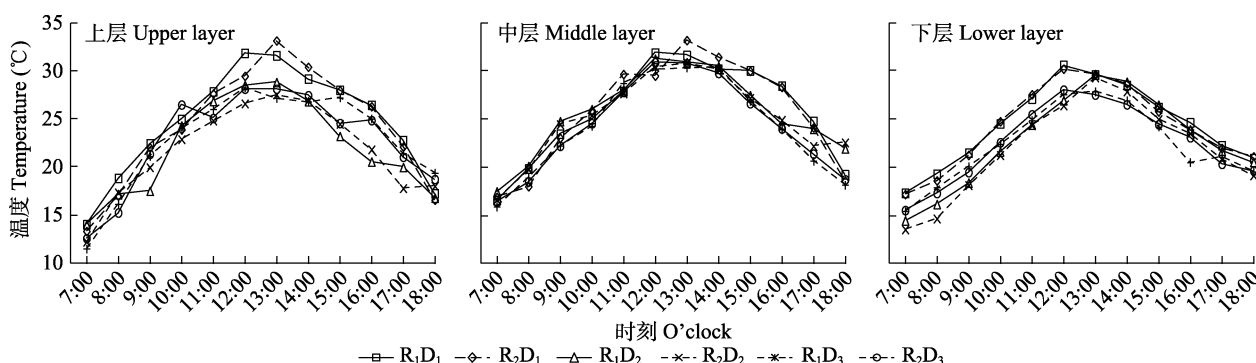


图4 水平结构配置对冬小麦冠层温度的影响(平均值±标准差)。R₁, 20 cm + 20 cm行距模式; R₂, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm行距模式。D₁, 120.0 kg·hm⁻²播量; D₂, 157.5 kg·hm⁻²播量; D₃, 195.0 kg·hm⁻²播量。

Fig. 4 Effects of horizontal structure on canopy temperature of *Triticum aestivum* (mean ± SD). R₁, 20 cm + 20 cm row spacing model; R₂, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm row spacing model. D₁, 120.0 kg·hm⁻² sowing rate; D₂, 157.5 kg·hm⁻² sowing rate; D₃, 195.0 kg·hm⁻² sowing rate.

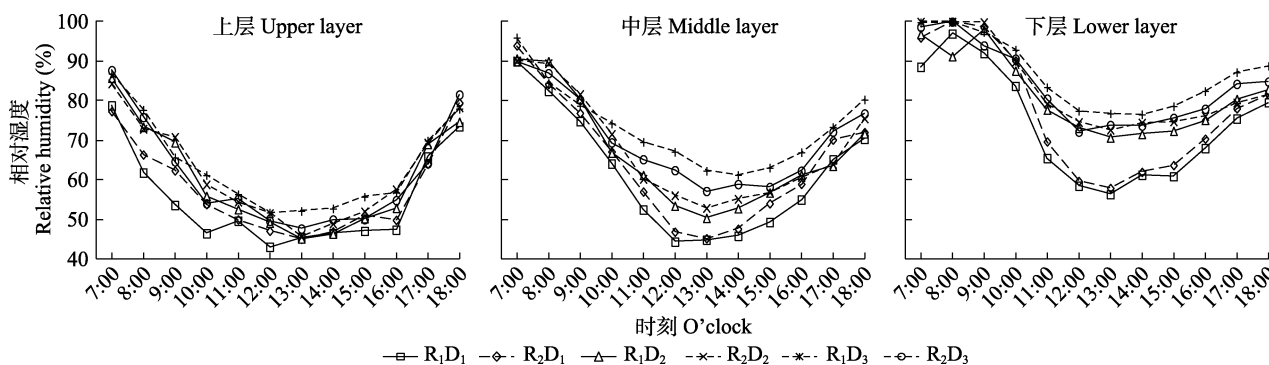


图5 水平结构配置对冬小麦冠层相对湿度的影响(平均值±标准差)。R₁, 20 cm + 20 cm行距模式; R₂, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm行距模式。D₁, 120.0 kg·hm⁻²播量; D₂, 157.5 kg·hm⁻²播量; D₃, 195.0 kg·hm⁻²播量。

Fig. 5 Effects of horizontal structure on canopy relative humidity of *Triticum aestivum* (mean ± SD). R₁, 20 cm + 20 cm row spacing model; R₂, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm row spacing model. D₁, 120.0 kg·hm⁻² sowing rate; D₂, 157.5 kg·hm⁻² sowing rate; D₃, 195.0 kg·hm⁻² sowing rate.

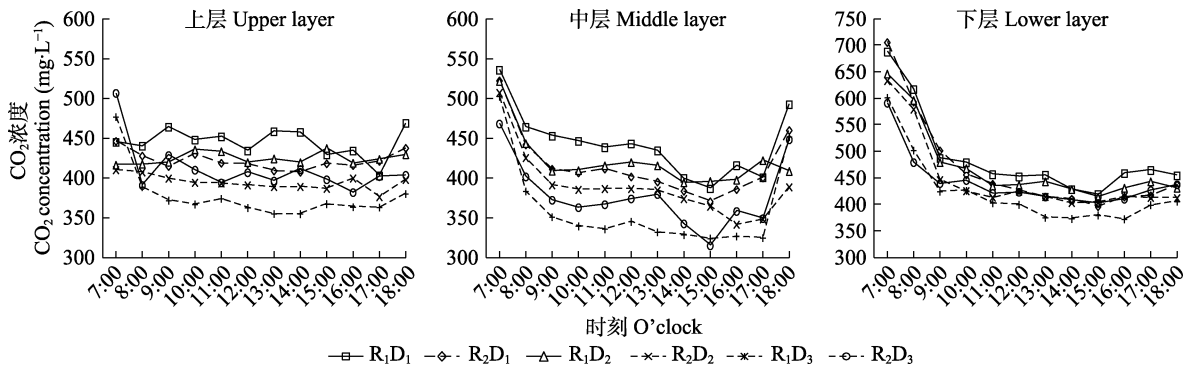


图6 水平结构配置对冬小麦冠层CO₂浓度的影响(平均值±标准差)。R₁, 20 cm + 20 cm行距模式; R₂, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm行距模式。D₁, 120.0 kg·hm⁻²播量; D₂, 157.5 kg·hm⁻²播量; D₃, 195.0 kg·hm⁻²播量。
Fig. 6 Effects of horizontal configuration on canopy CO₂ concentration of *Triticum aestivum* (mean ± SD). R₁, 20 cm + 20 cm row spacing model; R₂, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm row spacing model. D₁, 120.0 kg·hm⁻² sowing rate; D₂, 157.5 kg·hm⁻² sowing rate; D₃, 195.0 kg·hm⁻² sowing rate.

现为下层>上层>中层,且在冠层下层CO₂浓度变化相对均匀。在同一行距配置下,冬小麦冠层各层次CO₂浓度随着播量增加而降低,尤其是中层CO₂浓度随播量变化程度最大,其次为下层CO₂浓度。在相同播量下,各层次CO₂浓度R₂行距配置均低于R₁配置,两行距间特别是在冠层中层、上层相差较大。

2.3 水平结构配置对冬小麦产量及产量构成因素的影响

由表4可知,不同水平结构配置下冬小麦的穗数、穗粒数、千粒质量及产量分别以R₂D₃、R₂D₁、R₂D₁和R₂D₂最大。在相同行距配置下,小麦的穗数随着播量增大而增大,而穗粒数和千粒质量却随播量增大而降低,小麦籽粒产量均以D₂播量下最大,穗粒数、千粒质量及籽粒产量均随播量变化而差异

显著;在相同播量水平下,R₂行距配置穗粒数、千粒质量和籽粒产量高于R₁配置,且行距间差异显著。

3 讨论

3.1 水平结构配置与冬小麦冠层垂直结构

良好的冠层结构应该具有通风透光,株型紧凑,旗叶直立,倒二叶较斜弯,倒三叶弯斜的特征(张玲丽等, 2004),通过改善中下层叶片光环境,能提高光能利用率和产量(陈雨海等, 2003)。LAI与MLA是反映小麦群体光辐射特征的重要指标(李春明等, 2009),其大小影响小麦群体光截获能力,从而影响光能利用率,而光能利用率又与干物质生产能力和产量密切相关(杨国敏等, 2009; 张黛静等, 2014)。王之杰等(2003)认为,在小麦灌浆期MLA随着密度增

表4 水平结构配置对冬小麦产量的影响(平均值±标准差)
Table 4 Effects of different horizontal structure on yield of *Triticum aestivum* (mean ± SD)

行距配置 Row spacing configuration	播量 Sowing rate	穗数 Spike number (10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grain number per panicle	千粒质量 1 000 grain mass (g)	籽粒产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)
R ₁	D ₁	580.03 ± 10.05 ^b	42.57 ± 0.05 ^b	44.68 ± 0.02 ^b	8 080.69 ± 142.68 ^e
	D ₂	691.11 ± 2.55 ^a	42.14 ± 0.08 ^{cd}	43.86 ± 0.20 ^d	8 695.18 ± 7.14 ^b
	D ₃	707.53 ± 18.37 ^a	41.45 ± 0.11 ^e	42.53 ± 0.12 ^f	8 503.09 ± 84.99 ^c
R ₂	D ₁	589.20 ± 7.48 ^b	42.90 ± 0.08 ^a	45.05 ± 0.10 ^a	8 268.27 ± 23.68 ^d
	D ₂	694.20 ± 17.01 ^a	42.26 ± 0.08 ^c	44.36 ± 0.05 ^{bc}	8 883.83 ± 57.74 ^a
	D ₃	705.87 ± 19.05 ^a	41.98 ± 0.18 ^d	43.44 ± 0.35 ^e	8 673.43 ± 27.22 ^b
R	F	0.19	28.35 ^{**}	32.06 ^{**}	18.51 ^{**}
D	F	92.86 ^{**}	93.33 ^{**}	116.22 ^{**}	73.13 ^{**}
R × D	F	0.15	3.89 [*]	2.25	0.20

R₁, 20 cm + 20 cm行距模式; R₂, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm行距模式。D₁, 120.0 kg·hm⁻²播量; D₂, 157.5 kg·hm⁻²播量; D₃, 195.0 kg·hm⁻²播量。同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$ 。
R₁, 20 cm + 20 cm row spacing model; R₂, 12 cm + 12 cm + 12 cm + 24 cm row spacing model. D₁, 120.0 kg·hm⁻² sowing rate; D₂, 157.5 kg·hm⁻² sowing rate; D₃, 195.0 kg·hm⁻² sowing rate. Different lowercase letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

大而增大,然而当种植密度过大又会导致群体透光率低,植株之间遮光严重,其LAI下降迅速(张永丽等, 2008; 张黛静等, 2014)。而通过改变MLA可使光能合理地利用,提高冬小麦群体的MLA,特别是群体上部冠层平均叶倾角的提高,有利于改善群体内部的通风透光能力(李春明等, 2009)。本研究表明随着播量增大,其LAI呈先增大后降低的趋势,而DIFN则逐渐减小。这和张黛静等(2014)的研究结果一致。本试验同时发现小麦中层、下层MLA随着播量增大表现先增大后降低的趋势,这可能因为高播量群体中层、下层叶片迅速衰老枯萎,导致MLA降低,这一点在LAI也同样表现。进一步研究表明,在同一播量水平下, R_2 行距各层次的DIFN、MLA和LAI高于 R_1 ,这可能是因为 R_2 行距下,由于12 cm窄行距的设置,在单位面积上起到了“缩行扩株”的效果,从而使小麦植株个体之间的聚集程度降低,一定程度上减轻了个体之间的竞争,同时,又由于 R_2 处理中24 cm宽行距存在,为群体提供通风透光“走廊”,从而提高小麦的DIFN,有利于群体通风透光,延缓后期叶片衰老。

3.2 水平结构配置对冬小麦群体微环境的调控效应

作物冠层微环境也是影响作物的生长发育、籽粒灌浆及产量重要因素,有研究(樊廷录等, 2007)认为在灌浆中后期冠层温度每升高1 °C,旱地冬小麦产量减少近280 kg·hm⁻²,而通过行距配置可以有效改变作物群体微环境。薛盈文等(2015)认为,缩小行距、增加行内植株分布均匀性可以降低群体冠层下部温度,增加相对湿度,特别是能明显降低午间高温阶段冠层内部温度。杨文平等(2008)研究认为,同一行距配置垂直方向小麦群体微环境具有一定的差异,距地面位置越高湿度越低,冠层温度则表现“中间高上下低”,CO₂浓度则表现为下层浓度最高,上层次之,中层最低。本试验CO₂浓度、冠层温度和相对湿度在垂直方向的分布与杨文平等(2008)的研究结果基本一致,进一步研究发现,随着播量增大,其冠层各层次群体温度、CO₂浓度降低,相对湿度增加。同时还表明在同一播量下 R_2 行距较 R_1 更能降低小麦冠层温度、CO₂和提高相对湿度,这是由于 R_2 行距配置MLA较高,有利于光能向下层辐射,并且 R_2 中24 cm宽行距“走廊”提高小麦群体通风透光能力,有利于提高小麦群体光合能力,因此 R_2 小麦群体CO₂浓度低于 R_1 ,同时 R_2 中的12 cm窄行距与外界

环境之间流通慢,具有一定的保温保湿作用,因此群体 R_2 行距配置具有较高的相对湿度和较低的温度。

3.3 水平结构配置对冬小麦产量及其构成因素的影响

作物田间最适宜分布,是指产量最大时,植株间行距、株距最合理的配置(朱云集等, 2001)。有研究(张永丽等, 2008)认为穗粒数和千粒质量随着播量增大而降低,而通过提高小麦群体内部光环境,有利于提高粒质量和穗粒数(李升东等, 2009)。又有研究认为在小麦灌浆中后期的冠层温度对产量具有较大影响,降低温度有利于籽粒灌浆(邓强辉, 2009)。本试验结果表明,在同一行距下,冬小麦穗数随播量增大而增大,而穗粒数及千粒质量却显著降低,这与前人研究结果一致,主要因为,在一定范围内,增加播量,增大了单位面积植株个体的数量,从而提高了穗数,但由于密度的增大,个体间对光、温及地下水分养分的竞争加剧,从而导致穗粒数与千粒质量降低,本文对冠层垂直结构和群体微环境的研究,也证明了这一点。同时,在相同播量下, R_2 行距配置穗粒数、千粒质量和产量均显著大于 R_1 ,这正是由于前述 R_2 配置中12 cm窄行距在单位面积上“缩行扩株”效果和24 cm宽行距通风透光“走廊”的存在,塑造了 R_2 行距配置下较好的冠层垂直结构和适宜的群体环境,在降低个体间竞争的同时,减缓了小麦的衰老进程,延长小麦光合及灌浆时间,从而形成了较高的粒质量和穗粒数。

综上所述,由于小麦的田间水平结构配置的变化,小麦冠层垂直结构及群体微环境亦产生较大的改变,从而最终形成小麦产量构成要素和产量的显著不同。与 R_1 相比, R_2 由于12 cm窄行距“缩行扩株”效果和24 cm宽行距通风透光“走廊”的同时存在,从而具有较大的光合面积,适宜的MLA、DIFN和群体环境,进而形成较为协调的产量三要素,为小麦最终产量显著提高奠定基础。因此,在小麦绿色高产栽培中,应该考虑改变当前小麦生产中大面积存在的均一的田间水平结构配置,塑造小麦农田小气候,优化小麦冠层结构,形成协调的产量三要素,从而充分挖掘有限土地面积上小麦的光合潜力,提高光、温、水、肥资源的利用效率,达到绿色高产高效的目的。在本试验条件下,以 R_2D_2 配置下冠层结构、微环境和产量最佳。

参考文献

- Chen YH, Yu SL, Yu ZW (2003). Relationship between amount or distribution of PAR interception and grain output of wheat communities. *Acta Agronomica Sinica*, 29, 730-734. [陈雨海, 余松烈, 于振文 (2003). 小麦生长后期群体光截获量及其分布与产量的关系. 作物学报, 29, 730-734.]
- Deng QH, Pan XH, Shi QH (2009). Research advances on crop canopy temperature. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 1162-1165. [邓强辉, 潘晓华, 石庆华 (2009). 作物冠层温度的研究进展. 生态学杂志, 28, 1162-1165.]
- Fan TL, Song SY, Xu YP, Li XM (2007). Relationship between canopy temperature and water use efficiency/grain yield among dryland winter wheat genotypes during grain filling stage. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 4491-4497. [樊廷录, 宋尚有, 徐银萍, 李兴茂 (2007). 旱地冬小麦灌浆期冠层温度与产量和水分利用效率的关系. 生态学报, 27, 4491-4497.]
- Li CM, Xiong SP, Yang YY, Ma XM (2009). Effects of different fertilizer treatments on canopy architecture and grain yield characteristics of winter Wheat-Yumai 49. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 2514-2519. [李春明, 熊淑萍, 杨颖颖, 马新明 (2009). 不同肥料处理对豫麦49小麦冠层结构与产量性状的影响. 生态学报, 29, 2514-2519.]
- Li J, Wang HZ, Xu JY, Liu P, Zhang JW, Zhao B, Ren BZ (2020). Effects of different cultivation modes on canopy structure and photosynthetic performance of summer maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 53, 4550-4560. [李静, 王洪章, 许佳诣, 刘鹏, 张吉旺, 赵斌, 任佰朝 (2020). 不同栽培模式对夏玉米冠层结构及光合性能的影响. 中国农业科学, 53, 4550-4560.]
- Li NN, Tian QZ, Wang SL, Xie LJ, Pei YT, Li H (2010). Responses and regulation of canopy microclimate on formation spike from tillers of two types of wheat. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 289-297. [李娜娜, 田奇卓, 王树亮, 谢连杰, 裴艳婷, 李慧 (2010). 两种类型小麦品种分蘖成穗对群体环境的响应与调控. 植物生态学报, 34, 289-297.]
- Li SD, Wang FH, Si JS, Kong LA, Feng B, Zhang B, Liu JJ, Qin XS (2009). Light distribution in wheat population and its effect on leaf photosynthetic rate under raised-bed planting method. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 17, 465-468. [李升东, 王法宏, 司纪升, 孔令安, 冯波, 张宾, 刘建军, 秦晓胜 (2009). 垄作小麦群体的光分布特征及其对不同叶位叶片光合速率的影响. 中国生态农业学报, 17, 465-468.]
- Li SY, Feng W, Wang YH, Wang CY, Guo TC (2013). Effects of spacing interval of wide bed planting on canopy characteristics and yield in winter wheat. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 758-767. [李世莹, 冯伟, 王永华, 王晨阳, 郭天财 (2013). 宽幅播种带间距对冬小麦冠层特
- 征及产量的影响. 植物生态学报, 37, 758-767.]
- Nie SW, Zhang QP, Zhang YT, Bao DJ (2018). Effects of different optimum and balanced fertilization practices on micro-environment within winter wheat's group. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 35, 311-317. [聂胜委, 张巧萍, 张玉亭, 宝德俊 (2018). 不同优化平衡施肥措施对冬小麦田间群体微环境的影响. 农业资源与环境学报, 35, 311-317.]
- Reynolds M, Foulkes J, Furbank R, Griffiths S, King J, Murchie E, Parry M, Slafer G (2012). Achieving yield gains in wheat. *Plant, Cell & Environment*, 35, 1799-1823.
- Spielmeyer W, Richards RA (2004). Comparative mapping of wheat chromosome 1AS which contains the tiller inhibition gene (tin) with rice chromosome 5S. *Theoretical and Applied Genetics*, 109, 1303-1310.
- Sun SJ, Zhou XB, Chen YH, Yang GM, Xu DL, Yang RG (2008). Effects of different distribution patterns of winter wheat population on farmland micro-climate and yield. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 24, 27-31. [孙淑娟, 周勋波, 陈雨海, 杨国敏, 徐德力, 杨荣光 (2008). 冬小麦种群不同分布方式对农田小气候及产量的影响. 农业工程学报, 24, 27-31.]
- Wang YT, Yi Y, Zhang JX, Hou LB, Kang JT, Dong XK (2009). Effects of irrigation on winter wheat photosynthetic character and canopy structure. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 27, 63-66. [王艺陶, 衣莹, 章建新, 侯立白, 康建涛, 董祥开 (2009). 不同灌水处理对冬小麦冠层结构及光合特性的影响. 干旱地区农业研究, 27, 63-66.]
- Wang ZJ, Guo TC, Zhu YJ, Wang JH, Zhao M (2003). Study on character of light radiation in canopy of super-high-yielding winter wheat. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 23, 1657-1662. [王之杰, 郭天财, 朱云集, 王纪华, 赵明 (2003). 超高产小麦冠层光辐射特征的研究. 西北植物学报, 23, 1657-1662.]
- Xiong SP, Cao WB, Zhang ZY, Zhang J, Gao M, Fan ZH, Shen SJ, Wang XC, Ma XM (2021). Effects of row spacing and sowing rate on vertical distribution of photosynthetically active radiation, biomass, and grain yield in winter wheat canopy. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32, 1298-1306. [熊淑萍, 曹文博, 张志勇, 张捷, 高明, 樊泽华, 沈帅杰, 王小纯, 马新明 (2021). 行距和播种量对冬小麦冠层光合有效辐射垂直分布、生物量和籽粒产量的影响. 应用生态学报, 32, 1298-1306.]
- Xiong SP, Meng XP, Wang XC, Ma XM, Zhang J, Wei QQ, Liu Y (2018). Effects of wheat and maize integrated population patterns on the canopy structure and yield of wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 38, 970-978. [熊淑萍, 孟香苹, 王小纯, 马新明, 张捷, 魏钦钦, 刘洋 (2018). 小麦玉米一体化群体配置对小麦冠层结构和产量影响. 麦类作物学报, 38, 970-978.]
- Xue YW, Zhang YH, Huang Q, Wang ZM (2015). Effects of

- narrow row spacing and uniform sowing on canopy environment, individual plant traits, and biomass production in late-sowing winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 5545-5555. [薛盈文, 张英华, 黄琴, 王志敏 (2015). 窄行匀播对晚播冬小麦群体环境、个体性状和物质生产的影响. *生态学报*, 35, 5545-5555.]
- Yang GM, Sun SJ, Zhou XB, Chen YH, Qi L, Gao HJ, Liu Y (2009). Effects of population distribution pattern and irrigation schedule on radiation utilization in winter wheat farmland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20, 1868-1875. [杨国敏, 孙淑娟, 周勋波, 陈雨海, 齐林, 高会军, 刘岩 (2009). 群体分布和灌溉对冬小麦农田光能利用的影响. *应用生态学报*, 20, 1868-1875.]
- Yang WP, Guo TC, Liu SB, Wang CY, Wang YH, Ma DY (2008). Effects of row spacing in winter wheat on canopy structure and microclimate in later growth stage. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 485-490. [杨文平, 郭天财, 刘胜波, 王晨阳, 王永华, 马冬云 (2008). 行距配置对‘兰考矮早八’小麦后期群体冠层结构及其微环境的影响. *植物生态学报*, 32, 485-490.]
- Zhang DJ, Ma X, Wang XD, Yang JR, Wang DD, Wang Z, Chen HT, Li CX (2014). Effects of variety and density on photosynthetic traits and light utilization efficiency of wheat in middle Henan Province. *Journal of Triticeae Crops*, 34, 388-394. [张黛静, 马雪, 王晓东, 杨杰瑞, 王多多, 王真, 陈惠婷, 李春喜 (2014). 品种与密度对豫中地区小麦光合生理特性及光能利用率的影响. *麦类作物学报*, 34, 388-394.]
- Zhang LL, Wang H, Sun DJ, Feng Y (2004). Canopy morphology structure and its correlation with yield characters of high-yield wheat cultivars. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 24, 1211-1215. [张玲丽, 王辉, 孙道杰, 冯毅 (2004). 高产小麦品种冠层形态结构及其与产量性状的关系. *西北植物学报*, 24, 1211-1215.]
- Zhang YL, Lan L, Li YM, Xiao K (2008). Effects of planting density on population growth and grain yield of hybrid wheat C6-38/Py85-1. *Journal of Triticeae Crops*, 28, 113-117. [张永丽, 蓝岚, 李雁鸣, 肖凯 (2008). 种植密度对杂种小麦C6-38/Py85-1群体生长和籽粒产量的影响. *麦类作物学报*, 28, 113-117.]
- Zhu YJ, Guo RL, Guo TC (2001). Effect of spacing form and density on quality of population and grain yield of Lankao 906. *Journal of Triticeae Crops*, 21, 62-66. [朱云集, 郭汝礼, 郭天财 (2001). 行距配置与密度对兰考906群体质量及产量的影响. *麦类作物学报*, 21, 62-66.]

责任编辑: 李凤民 责任编辑: 李 敏