

行距对晚播冬小麦群体的调节效应*

薛盈文^{1,2} 王志敏¹ 张英华^{1**}

(¹中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; ²黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江大庆 163319)

摘要 为了明确行距对晚播冬小麦群体的调节效应,在2011—2013年度,以“济麦22”为试验材料,在晚播条件下设置3个行距处理(12、20、30 cm),比较了不同行距类型群体生育后期的冠层结构和冠层下部环境的差异、群体内植株个体性状及变异程度、产量和产量构成因素的变化。结果表明:行距缩小至12 cm,群体生育后期的叶面积指数显著提高,中上部冠层的光能截获显著增加、冠层下部的漏光损失显著减小;与20 cm和30 cm行距相比,12 cm行距群体内部的最高温度分别降低0.9和2.5℃,相对湿度增加0.3%和0.9%;行距缩小后,群体内单株性状的变异程度缩小,穗长和小穗数显著增加,单株穗粒重变异系数缩小,群体产量的稳定性提高,产量增加7.8%~24.5%。研究认为,窄行距(12 cm)播种有利于提高华北平原干旱缺水地区晚播冬小麦的群体产量。

关键词 行距;晚播;冬小麦;环境因素;单株性状

中图分类号 S311 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2015)11-3072-07

Regulating effect of row spacing on the population of late-sowing winter wheat. XUE Ying-wen^{1,2}, WANG Zhi-min¹, ZHANG Ying-hua^{1**} (¹College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; ²College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(11): 3072–3078.

Abstract: In order to investigate the effect of row spacing on the population of late-sowing winter wheat, a widely planted cultivar, Jimai 22, was sown with row spacing at 12, 20, and 30 cm (denoted as J12, J20 and J30, respectively) during 2011–2013. Canopy structure and environmental factors under the canopy, individual plant traits and their variations, yield and yield components were analyzed. The results showed that the population's leaf area index in treatment J12 increased significantly during the late growth stage, the light intercept increased significantly and the loss of light leakage decreased apparently. Compared with J20 and J30 treatments, within J12 population the maximum temperature decreased by 0.9 and 2.5℃, and the relative humidity increased by 0.3% and 0.9%, respectively. The variation of individual plant traits in J12 treatment decreased, spike length and spikelet number increased significantly, and the variation of grain yield per spike decreased, which increased the stability of the population yield, and increased the grain yield by 7.8%–24.5%, compared with J20 and J30. It was concluded that narrow row spacing (12 cm) benefited the grain yield of late-sowing winter wheat in the areas with water shortage in the North China Plain.

Key words: row spacing; late sowing; winter wheat; environmental factors; individual plant trait.

小麦产量是群体内个体单株生产力的综合表现,产量形成受到品种、环境因素、肥水管理等多方面因素的影响和制约;同时,区域产量又因栽培管理

措施而存在较大差异(王德轩等,1988)。华北地区是中国小麦的主产区,但该区域水资源十分紧缺,为提高“冬小麦-夏玉米”一年两熟制的资源利用效率,近年来广泛推行“冬小麦晚播、夏玉米晚收”的“双晚”栽培模式(王志敏等,2006;付雪丽等,2009)。在此模式中,冬小麦晚播不仅延长了夏玉米生育期、

*北京市青年英才专项(YETP0300)、公益性行业科研专项(201303133,201203031)、国家自然科学基金项目(31401297)和小麦产业技术体系项目(CARS-3-1-25)资助。

**通讯作者 E-mail: yhzhang@cau.edu.cn

收稿日期:2015-03-04 接受日期:2015-07-22

提高了夏玉米产量,而且减少了冬小麦前期水肥消耗、有利于节水生产(王志敏等,2006;高海涛等,2012)。另外,晚播冬小麦因个体发育和生物量受到限制,必须通过增加播种量、增加群体数量来保证足够穗数,从而稳定或提高群体产量。但是,在当前农户分散经营的种植模式下,由于播期不一致、整地质量较差等因素,实际生产中播种量偏大、基本苗差异较大、重漏播等现象严重,出现冬前肥水资源的严重浪费、行间群体数量差异较大、行内个体竞争加剧等问题,进而造成同一地块内产量的斑块现象普遍、不同地块间的产量差异较大等问题。因此,如何调节群体结构、减小个体间竞争是晚播冬小麦极为重要的生产问题。关于小麦群体的调节措施,国内外研究报道较多,多数是通过调整播量和行距来协调群体内个体之间的矛盾(Johnson *et al.*, 1988; Teich *et al.*, 1993; Rasmussen, 2004; 孙振中等, 2011; 郑亭等, 2013)。但有关行距对小麦产量的影响效应,往往又因不同的生态区域、播期、播量、品种特性和种植制度而存在差异(Marshall *et al.*, 1987; Teich *et al.*, 1993; 郭天财等, 2008; 赵竹等, 2011),有些地区采用“宽幅精播技术”能提高产量(余松烈等, 2010; 韩惠芳等, 2013),另有学者提出播种带宽也会影响小麦产量和品质(马新明等, 2003),但中国北方干旱地区晚播冬小麦节水高产栽培的适宜行距还有待明确。在晚播高密度条件下,行距调整可能是群体调节最简易可行的栽培措施,通过缩小行距,增加行数,扩大行内株距,可以减少行内竞争,并能减少行间土壤水分蒸发(王志敏等, 2006; 张胜全等, 2009)。此外,在有关生理机制研究报道中,有研究指出行距调整会影响旗叶蔗糖酶活性和籽粒灌浆速率(冯伟等, 2009);还有学者针对冠层温度对冷型小麦耐旱机制进行了相关研究(冯佰利等, 2005)。上述研究从不同角度分析了栽培措施和外界环境条

件对不同类型小麦群体物质生产影响的生理机制,但针对行距调整对晚播冬小麦群体冠层结构、生育后期群体内环境因素、不同类型群体内单株性状变异程度影响的研究未见报道。本研究在播期推迟(10月15日左右)、增大播量的情况下,针对当地主栽品种设置不同行距,研究行距调整对群体生育后期冠层结构、群体生育后期的环境因素的影响,同时对不同行距群体内的单株性状差异和变异程度进行分析,并结合群体产量和产量构成因素的比较,阐明行距调整对晚播冬小麦群体的调节效应,以期生产中晚播高产冬小麦群体的构建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验条件与试验设计

试验于2011—2013年度在中国农业大学吴桥实验站(37°41'02" N, 106°37'23" E)进行,该区域全年光照2724.8 h,年平均气温12.9℃,无霜期201 d,小麦生长季内的降雨量如图1所示。试验地为壤质底黏潮土,播种前耕层基础地力情况列于表1。以华北地区主栽的冬小麦品种——济麦22为试验材料,采用机械播种,设置3个行距处理:12 cm(J12)、20 cm(J20)、30 cm(J30),由于生产中行距多在20 cm左右,本试验以20 cm行距为对照;试验采用完全随机区组设计,重复3次,小区面积24 m²。施肥量参照冬小麦简化栽培模式(王志敏等, 2006),尿素225 kg·hm⁻²、磷酸二铵300 kg·hm⁻²、硫酸钾150 kg·hm⁻²、硫酸锌15 kg·hm⁻²,均作底肥一次性施入。2011—2012年度的播种期为10月13日,田间基本苗为505万株·hm⁻²;2012—2013年度的播种期为10月15日,田间基本苗为597万株·hm⁻²,两年的前茬均为玉米,由于两年春季拔节期皆有降雨,生育期内均只浇开花水(750 m³·hm⁻²),使用水表控制灌水量。

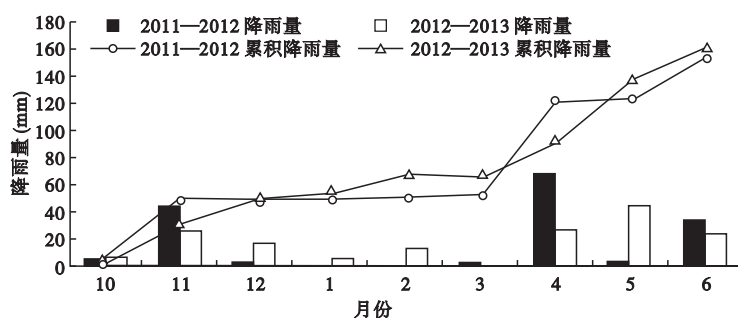


图1 2011—2013年度冬小麦生育期内降雨分布

Fig.1 Rainfall distribution during winter wheat growing seasons in 2011–2013

表 1 2011—2012 和 2012—2013 年度耕层土壤养分状况
Table 1 Nutrient content of top soil in 2011–2012 and 2012–2013

年度	全氮 (g · kg ⁻¹)	碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	速效磷 (mg · kg ⁻¹)	速效钾 (mg · kg ⁻¹)	有机质 (g · kg ⁻¹)	pH
2011—2012	0.92±0.06	57.8±0.6	44.6±0.2	91.0±0.6	10.7±0.2	7.8±0.1
2012—2013	0.85±0.08	55.4±0.4	45.5±0.3	88.3±0.4	9.5±0.3	7.7±0.1

1.2 测定项目和方法

1.2.1 冠层分析 选择小区中间的标记地点,利用 CI-110 冠层分析仪在冠层底部垂直向上截取冠层图像,将天顶角划为 5 环,步长值设定为 12°,5 个天顶角度分别为 13°、25°、37°、49°和 61°,测定时间选择灌浆期的傍晚,操作时鱼镜头放在行间地表之上 1 cm 处,每个处理测定 5 点。将获得的图像用 CI-110 软件进行图像提取和分析,可以得到以下参数:平均叶倾角(mean leaf inclination angle, *MLA*)、散射辐射透过系数(transmission coefficient for diffuse penetration, *TD*)、不同天顶角内直接辐射透过系数(transmission coefficient for radiation penetration, *TR*)和不同角度冠层的消光系数(*K*);其中,叶面积指数(leaf area index, *LAI*)依据比叶重法计算(张宪政, 1992)。

1.2.2 群体下部环境因素的动态监测 在冠层分析的标记区域,测定时期为灌浆期的无雨天气,测定部位为各处理行间的冠层下部(距地上部 10 cm),使用浙江托普仪器公司 TNHY-4 型环境监测仪的光照、温度和相对湿度传感器,在白天定点(3 点/处理)、定时(时间间隔为 10 min)进行连续监测,仪器自动记录不同测定时间冠层下部的温度(℃)、相对湿度(RH,%)和光合有效辐射(μmol · m² · s⁻¹),同时测定冠层上部的上述 3 个指标,将冠层下部与冠层顶部光照强度的比值作为相对光强值。由于两个年度对应生育期内各项指标的比较趋势一致,本文采用 2012—2013 年度的环境因素数据为例加以分析。

1.2.3 单株性状和产量构成因素测定 小麦成熟期,在各处理重复内并列选取长 1 m 的样段,为了避免边际效应的影响,J12 选择中间的 4 行、J20 和 J30 选择中间的 3 行,每处理 3 次重复;同时,在每个处理内随机选 9 个样点,每个样点随机拔取 20 个成穗单株,调查各株株高、茎粗、穗长、小穗数、穗粒数、穗粒重和单株(单茎)干重等性状,分株记载。理论产量的计算公式为:理论产量(kg · hm⁻²)= 收获穗数(10⁴ · hm⁻²)×穗粒数×千粒重(g)×10⁻⁶(张宪政,

1992)。每个处理小区内选择 2 m² 收获测产,以 13% 含水量为基础计算实际产量。

1.3 数据分析

使用 Excel 整理数据和作图,使用 DPS 7.05 数据处理系统进行统计分析,运用 Duncan 新复极差法进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 行距对晚播冬小麦群体冠层结构的影响 晚播群体各个处理灌浆期的冠层分析结果(表 2)表明,12 cm 行距处理(J12)的叶面积指数(*LAI*)显著高于其他两个处理;J12 的平均叶倾角(*MLA*)显著低于 J20 和 J30,J20 与 J30 处理间无显著差异。由于不同行距群体内的 *LAI* 和 *MLA* 存在较大差异,灌浆期群体下部行间的散射辐射透过系数(*TD*)在处理间差异显著,J30 显著高于其他两个处理(J12 和 J20)。对于直接辐射透过系数(*TR*),J12 群体 5 个角度范围内的 *TR* 显著低于其他两个处理(J20 和 J30);除 13°和 49°两个角度范围没有差异外,J20 其他 3 个天顶角范围的 *TR* 值都显著低于 J30。对于各个天顶角度内的群体消光系数(*K*),在 13°、25°

表 2 不同行距群体灌浆期的冠层分析
Table 2 Canopy analysis of different row spacing populations at filling stage

测定项目	J12	J20	J30
<i>LAI</i>	2.61±0.34 a	1.72±0.26 b	1.24±0.08 c
<i>MLA</i>	64.98±7.75 b	79.38±7.6 a	83.75±4.33 a
<i>TD</i>	0.16±0.03 c	0.34±0.04 b	0.43±0.01 a
<i>TR</i>	13°	0.45±0.08 b	0.68±0.15 a
	25°	0.29±0.03 c	0.59±0.10 b
	37°	0.18±0.04 c	0.46±0.03 b
	49°	0.12±0.03 b	0.30±0.08 a
	61°	0.08±0.03 c	0.18±0.04 b
<i>K</i>	13°	0.37±0.03 a	0.24±0.09 b
	25°	0.43±0.03 a	0.35±0.05 b
	37°	0.58±0.06 a	0.50±0.03 ab
	49°	0.75±0.02 a	0.72±0.01 a
	61°	1.06±0.04 b	1.12±0.03 ab

表中数值为 3 个重复的平均值,各项指标平均值后的字母表示行距处理间差异显著水平(*P*<0.05)。下同。

和 37°三个角度范围内,J12 显著高于 J30,这 3 个角度范围内的 K 值均随着行距的增加而降低。上述比较说明,行距对晚播冬小麦群体灌浆期的冠层结构影响较大,窄行距(J12)群体的叶片持绿期较长,且中上层叶片对入射光的截获量较大,有利于群体更多地截获和吸收光能。

2.2 行距对晚播冬小麦群体下部环境因素的影响

2.2.1 相对光强值 群体冠层下部的相对光强值可以反映中上部冠层对光能的截获程度。冠层下部的相对光强值越高或波动幅度越大,表明作物冠层中上部的光漏射量越多。3 种行距处理中(图 2),J30 处理冠层下部各个观测记录时刻的相对光强值显著高于其他两个处理,而且在 9:00—14:00 期间的变化幅度较大;J12 与 J20 的相对光强值在 14:00 之后的差距较小,在 14:00 之前,J12 的相对光强值变化幅度较小且显著低于 J20。说明在晚播条件

下,缩小行间距可以增加冬小麦群体冠层中上部的光能截获量,减少漏光损失。

2.2.2 温度和相对湿度 灌浆期是小麦群体物质代谢较为旺盛的时期,群体内部环境的优劣对灌浆期群体的光合作用和物质累积影响较大。从各个处理冠层下部温度的变化趋势(图 3)来看,J12 和 J20 在全天大部分时间段内的变化幅度较为接近,仅在 12:00—14:00 时段内,J12 的温度略低于 J20,处理间的差异不显著。与 J20 和 J30 相比,J12 群体内部的最高温度分别降低 0.9 和 2.5 °C;J30 的温度波动频率最大,在 9:00—16:00 时段内,J30 冠层下部的温度显著高于其他两个处理(J12 和 J20),而且在 10:00—14:00 时段内多数监测点的温度都高于 25 °C,午间持续高温会增加群体的呼吸消耗,不利于灌浆期籽粒的物质积累。各个处理冠层下部的相对湿度变化趋势(图4)与温度相反,在温度变化幅度较

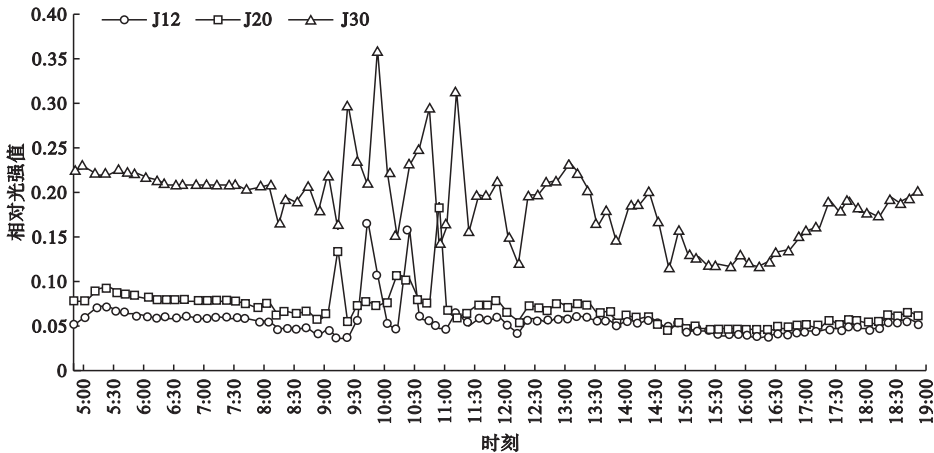


图 2 不同群体冠层下部相对光强值的变化趋势(2012—2013)
Fig.2 Changes of relative quantum value at the canopy bottom of different populations (2012—2013)

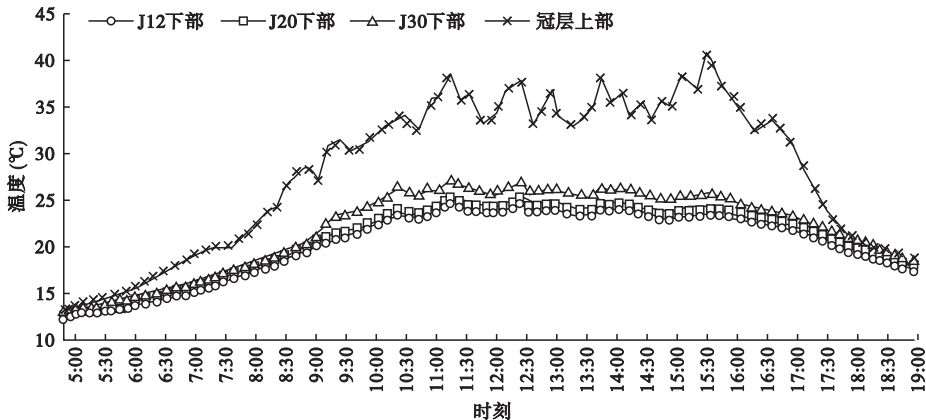


图 3 不同群体冠层下部温度的变化趋势(2012—2013)
Fig.3 Changes of temperature at the canopy bottom of different populations (2012—2013)

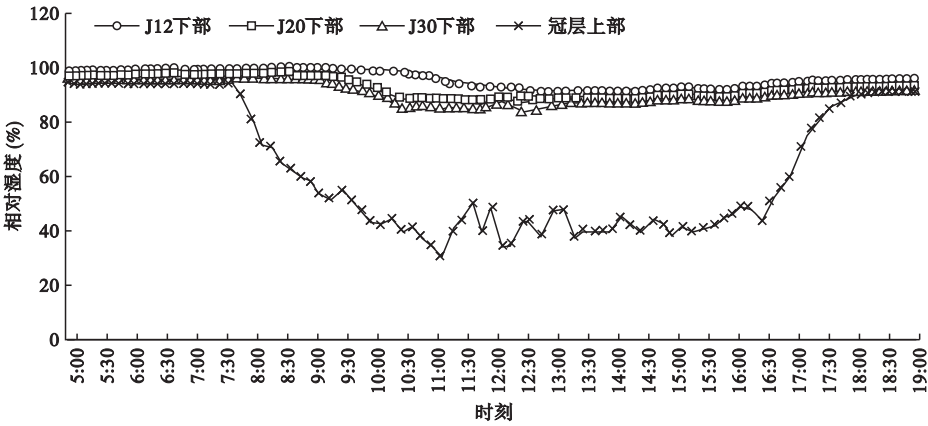


图 4 不同群体冠层下部相对湿度的变化趋势
Fig.4 Changes of relative humidity at the canopy bottom of different populations

表 3 不同行距群体单株性状指标的比较
Table 3 Comparison of single plant characteristics of different row spacing populations

单株性状 指标	J12			J20			J30		
	平均值	变幅	变异系数 CV (%)	平均值	变幅	变异系数 CV (%)	平均值	变幅	变异系数 CV (%)
株高	74.80 a	72.3~77.9	5.7	74.50 a	71.3~77.6	5.9	69.30 b	66.9~70.9	7.6
茎粗	2.84 a	2.53~3.14	17.3	2.78 a	2.48~3.24	18.7	2.69 a	2.51~2.94	19.3
穗长	7.80 a	7.3~8.2	5.9	7.50 b	7.2~7.8	6.9	7.40 b	7.0~7.8	7.1
小穗数	16.50 a	16~17	10.2	16.10 b	15~16	10.6	15.80 b	15~16	12.4
穗粒数	34.20 a	32~38	19.3	32.20 ab	30~36	20.3	31.00 b	29~36	23.1
穗粒重	1.10 a	0.97~1.24	27.2	1.09 a	0.85~1.28	28.4	1.08 a	0.91~1.31	30.9
单株干重	2.64 a	2.45~2.94	21.8	2.64 a	2.32~2.86	21.9	2.57 a	2.32~2.78	25.1

大的时间段(9:00—14:00)内,J30 的相对湿度显著低于 J12 和 J20,与 20 cm 和 30 cm 行距相比,12 cm 行距群体内部相对湿度的最大值分别增加 0.3%和 0.9%。冠层下部温度和相对湿度维持较小的波动范围并保持在适宜温度范围内,有利于小麦群体的光合作用和物质积累。

2.3 行距对晚播群体单株性状及产量构成因素的影响

比较晚播群体单株性状发现(表 3),各项指标的数值都随着行距的增加而降低;其中,J12 群体内单株性状中穗长和小穗数两项指标显著高于 J20 和 J30。此外,群体内单株性状的变异程度受行距宽窄的影响也较大,在 7 项单株性状指标中,株高和穗长的变异程度最小,单株穗粒重的变异程度最大,其中,J30 的单株穗粒重变异系数(CV)达到 30.9%,而且各项指标的变异系数呈现随着行距增大而增加趋势。这表明行距调整会影响晚播冬小麦群体内单株性状指标的变异程度,单株穗粒重的变异程度可能会导致群体内单株生产力的差异,进而影响晚播冬小麦群体的产量。

各个处理的产量构成因素如表 4 所示,收获穗数在处理间没有显著差异,穗粒数和千粒重随着行距的增加而减小,千粒重在 3 个处理间没有显著差异,穗粒数是处理间产量差异的主要因素,J12 的穗粒数显著高于 J30。从两年的实际产量来看,J12 相比于 J20 产量增幅为 7.8%和 9.2%,J12 显著高于 J30,产量增幅为 24.5%和 14.3%,而 J20 与 J30 处理间的产量无显著差异,由此可见,适当缩小行距(12 cm)可以提高晚播冬小麦群体的产量。

表 4 不同行距处理的产量构成因素和产量
Table 4 Yield and yield components of different row spacing treatments

年份	处理	收获穗数 ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数	千粒重 (g)	理论产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	实际产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2011—2012	J12	778.1 a	28.2 a	40.5 a	8886.7 a	8045.4 a
	J20	751.2 a	26.1 b	39.9 a	7822.9 b	7463.3 ab
	J30	735.2 a	25.3 b	39.7 a	7384.4 b	6462.4 b
2012—2013	J12	768.3 a	34.2 a	37.8 a	9932.3 a	9023.3 a
	J20	756.3 a	32.2 ab	37.4 a	9107.9 b	8260.4 b
	J30	754.4 a	31.1 b	36.9 a	8657.4 b	7891.2 b

3 讨论

叶片是小麦光合作用的主要器官,群体光环境的优劣对叶片光能利用率和群体生产力起决定性作用(黄高宝,1999)。本研究发现,在播种量一致的情况下,随着行距增大,行内植株间距离相对降低,行内植株间相互遮挡程度加大,个体间生长竞争加剧,后期叶片衰老加速,叶面积指数(LAI)降低,且叶倾角增大,冠层直接辐射透过系数增大,造成过宽行距(30 cm)群体内午前行间光漏射量增多,光能和热量资源利用效率低、产量下降,这与前人的报道(刘丽平等,2008)相近。12 cm行距处理(J12)灌浆期的叶面积指数($LAI=2.61$)显著高于其他行距处理,这有利于增加群体冠层中上层的光截获量、减少透过冠层中上部到达底部的光能损失。在对群体内环境因素的研究中,前人有关行距对群体光照环境的间断测定分析也有相关报道(杨文平等,2008),本研究采用连续动态的监测方法,且分析角度有所不同,能利用多点、连续记录数据来对不同处理群体在各个时间段内进行横向比较。此外,由于受试验条件和工作量所限,本研究并未进行定点单株叶面积、生育后期单株功能叶片表面温度、光合指标的监测和记录,有待于在今后对上述指标及其深层的生理机制进行深入研究。

行距调整也会影响晚播冬小麦群体冠层下部的环境因素,且与温度和相对湿度的变化密切相关,本研究中各行距处理冠层下部温度始终低于冠层顶部,此结果与胡延吉等(2000)的报道不同,这可能是因地域差异、品种特性和测定时期不同所致。群体冠层下部温度随着行距增加而增大,窄行距处理(J12)可以使晚播冬小麦群体内植株在行间和行内的分布相对均匀、行内单株所占空间面积增加、冠层光截获量增大、群体冠层下部温度和相对湿度的变化幅度减小,相对稳定的温湿度环境更利于群体生育后期的物质积累,并有可能减少午间高温阶段的呼吸消耗,这有待于在今后的研究中对晚播不同行距类型群体的光合速率、呼吸速率进行动态监测和分析。

单株性状比较中,穗粒重变异程度最大(其中,J30的穗粒重变异系数 $CV=30.9\%$),穗粒重变异系数随着行距的增加而增大,这可能是宽行距内植株个体由于相对占有空间面积小、植株个体间的生长竞争加剧,进而增大宽行距群体内植株个体性状的

差异和变异程度。在已有涉及单株性状的研究报道中,单株穗粒重的变异范围在 $22.1\% \sim 36\%$ (梁雪等,2012);本研究中,不同行距调整下穗粒重的变异范围为 $27.2\% \sim 30.9\%$ 。国内有关种植方式、基本苗数对作物群体内单株个体性状变异、群体整齐度影响的研究报道较少,仅有针对水稻群体内单株个体性状的报道,前人的研究表明,稀植栽培和插秧苗数对水稻单株穗粒数的影响最小(张俊国等,1999;2000)。在本研究中,30 cm行距处理的单株穗粒数变异程度较大($CV=23.1\%$),穗粒数的变异程度小于穗粒重,这与前述有关水稻群体内个体性状变异程度的部分结果一致。另外,在育种材料的后续世代选择中,有学者提出穗粒数可以作为反映群体和单株产量的一个选择依据,也从侧面说明单株穗粒数变异程度对群体产量的影响较大(Pedro *et al.*, 2012)。

产量构成因素比较中,随着行距的增加,收获穗数和穗粒数呈下降趋势,J12和J30两个处理的穗粒数差异显著,各行距处理间千粒重的差异在年际间表现不同,收获穗数低、穗粒数差异显著是30 cm行距处理产量显著低于12 cm行距的主要原因。此外,30 cm行距处理群体内单株穗粒数和穗粒重变异系数(表3)均大于其他两个处理(J12和J20),这可能是晚播宽行距群体内区域产量差异大且不稳定的主要原因。

综上所述,对于晚播冬小麦,适当缩小行距(12 cm)有利于群体生育后期维持较高的叶面积指数(LAI),增加群体冠层中上部的光截获量,减少漏光损失、保持相对稳定的温湿度环境,缩小群体内的单株性状差异,进而提高晚播冬小麦群体的产量。

参考文献

- 冯伟,王永华,郭天财,等. 2009. 株行距对小麦旗叶蔗糖代谢及产量的影响. 生态学杂志, **12**(11): 2515-2520.
- 冯佰利,高小丽,赵琳,等. 2005. 干旱条件下小麦冠层温度及其性状的关联研究. 生态学杂志, **24**(5): 508-512.
- 付雪丽,张惠,贾继增,等. 2009. 冬小麦-夏玉米“双晚”种植模式的产量形成及资源效率研究. 作物学报, **35**(9): 1708-1714.
- 高海涛,王育红,孟战赢,等. 2012. 小麦-玉米双晚种植对周年产量和资源利用的影响. 麦类作物学报, **32**(6): 1102-1106.
- 郭天财,刘胜波,冯伟,等. 2008. 不同种植行距的大穗型小麦品种‘兰考矮早八’中几种与旗叶衰老有关的生理指标变化. 植物生理学通讯, **44**(1): 33-36.

- 韩惠芳, 赵丹丹, 沈加印, 等. 2013. 灌水量和时期对宽幅精播冬小麦产量及品质特性的影响. 农业工程学报, **29**(14): 109–114.
- 胡延吉, 兰进好, 赵坦方, 等. 2000. 不同穗型的两个冬小麦品种冠层结构及光合特性的研究. 作物学报, **26**(6): 905–912.
- 黄高宝. 1999. 作物群体受光结构与作物生产力研究. 生态学杂志, **18**(1): 59–65.
- 梁雪, 吴春红, 宫晓平, 等. 2012. 不同钾处理下小麦重组自交系群体主要农艺性状的表型变异及其相关分析. 中国生态农业学报, **20**(5): 520–528.
- 刘丽平, 胡焕焕, 李瑞奇, 等. 2008. 行距配置和密度对冬小麦品种河农 822 群体质量及产量的影响. 华北农学报, **23**(2): 125–131.
- 马新明, 王志强, 李琳, 等. 2003. 带距对小麦蛋白质产量的影响及边际效应分析. 生态学杂志, **22**(1): 18–22.
- 孙振中, 欧阳竹, 刘丽平, 等. 2011. 行距配置对冬小麦/白三叶草间作系统小麦群体结构和光合有效辐射的影响. 中国生态农业学报, **19**(3): 554–560.
- 王德轩, 张正斌, 柴守玺, 等. 1988. 高产小麦合理群体和个体动态结构. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, (第8集): 94–104.
- 王志敏, 王璞, 李绪厚, 等. 2006. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术. 中国农业科技导报, **8**(5): 38–44.
- 杨文平, 郭天财, 刘胜波, 等. 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**(2): 485–490.
- 余松烈, 于振文, 董庆裕, 等. 2010. 小麦亩产 789.9 kg 高产栽培技术思路. 山东农业科学, **4**(1): 11–12.
- 张俊国, 李彻, 张三元, 等. 1999. 不同粳稻品种群体整齐度的比较分析. II. 超稀植栽培对品种性状及整齐度的影响. 吉林农业科学, **24**(1): 18–22.
- 张俊国, 李彻, 张三元, 等. 2000. 不同粳稻品种群体整齐度的比较分析. IV. 不同插秧苗数对品种性状及整齐度的影响. 吉林农业科学, **25**(3): 3–6.
- 张胜全, 方保停, 王志敏, 等. 2009. 春灌模式对晚播冬小麦水分利用及产量形成的影响. 生态学报, **29**(4): 2035–2044.
- 张宪政. 1992. 作物生理研究法. 北京: 中国农业出版社.
- 赵竹, 曹承富, 乔玉强, 等. 2011. 机播条件下行距与密度对小麦产量和品质的影响. 麦类作物学报, **31**(4): 714–719.
- 郑亭, 樊高琼, 陈溢, 等. 2013. 行数与行距配置对带状条播小麦群体及个体质量的影响. 作物学报, **39**(5): 885–895.
- Johnson JW, Hargrove WL, Moss RB. 1988. Optimizing row spacing and seeding rate for soft red winter wheat. *Agronomy Journal*, **80**: 164–166.
- Marshall GC, Ohm HW. 1987. Yield responses of 16 winter wheat cultivars to row spacing and seeding rate. *Agronomy Journal*, **79**: 1027–1030.
- Pedro A, Savin R, Slafer GA. 2012. Crop productivity as related to single-plant traits at key phenological stages in durum wheat. *Field Crops Research*, **138**: 42–51.
- Rasmussen IA. 2004. The effect of sowing date, stale seedbed, row width and mechanical weed control on weeds and yields of organic winter wheat. *Weed Research*, **44**: 12–20.
- Teich AH, Welacky T, Hamill A, et al. 1993. Row-spacing and seed-rate effects on winter wheat in Ontario. *Canadian Journal of Plant Science*, **73**: 31–35.

作者简介 薛盈文,男,1977年生,博士,助理研究员,主要从事作物生理生态和小麦常规育种工作。E-mail: xueyingwen1228@163.com

责任编辑 李凤芹
