

# 不同种植密度和土壤水分条件下 大田玉米冠层光结构分析

马冬青<sup>1,2</sup>, 佟玲<sup>1,2</sup>, 吴宣毅<sup>1,2</sup>, 李德智<sup>1,2</sup>, 杨胜举<sup>1,2</sup>, 王璐<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083; 2. 农业农村部作物高效用水武威科学观测实验站, 甘肃 武威 733000)

**摘要:**以石羊河流域普遍种植的玉米品种先玉335为供试材料,设置7万株·hm<sup>-2</sup>和10万株·hm<sup>-2</sup>两种种植密度,充分灌水(W1)、轻度亏缺(W2)、中度亏缺(W3)3种水分条件,测定不同层次冠层光合有效辐射的分布并分析冠层光结构指标在生育期的变化。结果表明:大田玉米下部冠层光分布较优,光结构指标数值约为上部冠层的1.1倍,整体而言,增大种植密度(10万株·hm<sup>-2</sup>)增强了冠层光能截获能力,光合有效辐射截获量(IPAR)在34.02~39.38 MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,光合有效辐射截获率抽穗期~灌浆期较低密度条件下升高0.40%~4.67%;种植密度增大(10万株·hm<sup>-2</sup>)引起群体尺度上光结构的明显劣化,消光系数(K)约为低密度条件下的83%,光合有效辐射在冠层内的衰减不均衡;拔节期低密度种植(7万株·hm<sup>-2</sup>)促进光结构指标的改善,随生育期推进,尤其在抽穗期密植(10万株·hm<sup>-2</sup>)时下部冠层的光合辐射利用效率降低约50%,这与作物自下而上的叶片衰老及光衰减不均衡有关;密植条件下(10万株·hm<sup>-2</sup>),水分亏缺处理导致辐射利用率平均降低3%,冠层各项指标受水分条件的影响较大。因此,为改善大田玉米冠层光结构,在密植条件下确保生育期中后期的充分供水十分重要。

**关键词:**玉米;种植密度;水分亏缺;冠层;光合有效辐射

**中图分类号:**S513 **文献标志码:**A

## Analysis of canopy light structure of maize with different planting density and soil water conditions

MA Dongqing<sup>1,2</sup>, TONG Ling<sup>1,2</sup>, WU Xuanyi<sup>1,2</sup>, LI Dezhi<sup>1,2</sup>, YANG Shengju<sup>1,2</sup>, WANG Lu<sup>1,2</sup>

(1. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Wuwei Experimental Station for Efficient Water Use in Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuwei, Gansu 733000, China)

**Abstract:** The canopy light structure is related to crop photosynthetic production. To explore the effects of planting density and soil water condition on the canopy light structure of maize, the “Xianyu 335”, which is commonly planted in the Shiyang River Basin, was used for field trials. Two plant densities, 70,000 and 100,000 plants·hm<sup>-2</sup>, were set with three water conditions, sufficient irrigation (W1) and slightly deficit irrigation (W2), and moderately deficit irrigation (W3). AccuPAR plant canopy analyzer was used to determine photosynthetically active radiation at different levels of canopy and the change of canopy light structure indicators during growth period were analyzed. The results showed that the light distribution in the lower canopy of field maize was better than in other locations, and the light structure index value was about 1.1 times of that of the upper canopy. On the whole, increasing the planting density (100 000 plants·hm<sup>-2</sup>) enhanced the ability of light interception, and the photosynthetic effective radiation interception (IPAR) was 34.02~39.38 MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, photosynthetically active radiation interception rate increased by 0.40%~4.67% at the lower density condition from heading stage to filling stage. Increasing planting density (100 000 plants·hm<sup>-2</sup>) caused significant degradation of the light structure at the population scale and unbalanced attenuation of photosynthetic effective radiation in the canopy. The extinction coefficient (K)

was 83% of that with the low density ( $70,000 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ ). At the jointing stage, the photosynthetic structure indicators were improved at low planting density. With the growth period, the photosynthetic radiation utilization efficiency of the lower canopy decreased by about 50% with the dense planting at the heading stage, especially, in dense planting ( $100,000 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), which was related to the senescence of the leaves of the maize from bottom to top and uneven attenuation in canopy. Under dense planting conditions, water deficit led to an average reduction of 3% in radiation utilization, and various light structure indicators of the canopy were greatly affected by the soil water conditions. Therefore, to improve the canopy light structure of field maize, it is very important to ensure adequate water supply in the middle and late growth stages under dense planting conditions.

**Keywords:** maize; planting density; water deficit; canopy; photosynthetically active radiation

玉米与小麦、水稻 3 种作物约占世界饮食需求的 60%, 在多种行业中发挥着重要作用, 不仅是主要的粮源之一, 在饲料、医药及生物质能源等方面也占有一席之地。中国是产量仅次于美国的玉米生产大国, 而国内玉米消耗量攀升, 给我国玉米生产带来压力<sup>[1]</sup>。石羊河流域是玉米种植业高度发展的重要区域, 素有“黄金走廊”之称, 而水资源匮乏和玉米耕地面积下降成为当地主要的限产因素<sup>[2]</sup>, 增大种植密度是提升产量和资源利用效率的有效途径。

冠层结构由 Monsi 等<sup>[3]</sup>于 1953 年首次提出, 玉米冠层是进行光合生产的主要场所, 内部形成独特的冠层内小气候。受水分条件、种植密度等外界农艺措施影响, 冠层内小气候也会发生变化<sup>[4-6]</sup>。不同层次冠层内的光分布对作物生物量积累至关重要, 尤其是与产量的形成存在密切联系。王洪君等<sup>[7]</sup>通过调整玉米行距来提高作物种植密度, 探究了乳熟期各个群体冠层结构对玉米群体光能利用的影响, 并分析种植密度对冠层结构以及产量的影响, 发现作物产量与消光系数之间具有显著的负相关关系, 并提出试验区适宜的行距组合为 70 cm、30 cm 以及 80 cm、30 cm。冠层光结构的改变主要通过外界措施对作物生长生理活动施加影响而实现, 有学者对这一原理进行了验证。Maddoni 等<sup>[8]</sup>通过开展不同的密度和行距试验探究叶片自然衰老的过程及冠层内光衰减的机理, 发现作物从苗期开始叶片生长与方位角受密度的显著影响, 当叶面积指数达到最大时, 超过  $9 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$  的种植密度处理光衰减现象不随行距和杂交品种发生变化。李华龙等<sup>[9]</sup>就不同生育期受旱对冬小麦冠层光合有效辐射截获率和辐射利用率 (*RUE*) 的影响进行探究, 发现受叶面积指数影响, 不同亏水处理的最大冠层光合有效辐射截获率不同, 进而导致消光系数有所差异。

国内外学者对作物冠层内光衰减机理、生长生

理活动进行了较全面的研究, 而从不同层次对冠层光结构的描述较少, 尤其是冠层光结构在生育期内的变化。本试验以石羊河流域普遍种植的玉米品种先玉 335 为供试材料, 从不同层次冠层的角度出发, 分析了不同种植密度与水分条件下各项光结构指标的变化规律, 从冠层角度为改善农艺措施和提升流域内大田玉米产量及水分利用效率提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况与试验设计

试验于 2019 年 4—9 月在甘肃省武威市中国农业大学石羊河农业与生态节水试验站进行 ( $102^{\circ}51'E, 37^{\circ}52'N$ ), 平均海拔 1 581 m。石羊河流域位于河西走廊东端, 乌鞘岭以西, 祁连山北麓, 属温带大陆性气候, 拥有丰富的光热资源, 全年日照时数可达 3 000 h 以上, 水资源相对匮乏, 多年平均降雨量仅有 164 mm, 年均蒸发量可达 2 000 mm, 地下水埋深在 25 mm 以下。试验区土壤质地为沙壤土, 1 m 深土层内平均土壤干容重为  $1.54 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 平均田间持水量为  $0.29 \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , 凋萎点为  $0.12 \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ <sup>[10]</sup>。

试验品种为先玉 335, 设置种植密度分别为 7 万株  $\cdot \text{hm}^{-2}$  和 10 万株  $\cdot \text{hm}^{-2}$ , 东西向种植。灌水方式采用膜下滴灌, 滴头流量为  $2.5 \text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ , 采用一膜两带四行的种植模式, 植株行距固定为 40 cm, 通过调整植株间距控制种植密度, 不同密度行距与株距如表 1 所示。分别在营养生长阶段后期与灌浆后期进行水分亏缺处理, W1 处理为充分灌溉, W2 与 W3 处理的灌水量分别为 W1 的 2/3 与 1/2, 各处理生育期内灌水时间与灌水量如表 2 所示。试验共 6 个处理, 每个处理 3 次重复, 采用随机区组设计。玉米于 2019 年 4 月 27 日播种, 参考当地施肥水平, 全生育期内施用  $\text{P}_2\text{O}_5$  (磷酸二铵)、 $\text{K}_2\text{O}$  (撒可富复合肥)、N (尿素) 分别为 165、60、300  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其中磷肥、钾肥和 40% 的氮肥用作基肥在播种前撒施, 其他管理措施与当地大田种植保持一致。

表1 供试大田玉米种植密度

Table 1 Planting density of maize in field

处理 Treatment	行距/cm Row spacing	株距/cm Plant spacing	密度/(万株·hm <sup>-2</sup> ) Density/(10 <sup>4</sup> plant·hm <sup>-2</sup> )
D1	40	35.7	7
D2	40	25	10

表2 全生育期大田玉米灌水时间与灌水量

Table 2 Irrigation treatments and schedules during the whole growth period of maize

处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount/mm							总灌水量 Total irrigation/mm
	06-01	06-12	07-07	07-19	08-02	08-14	08-30	
W1	24	41	74	57	76	76	44	392
W2	14	27	49	64	76	51	45	326
W3	11	21	37	73	76	38	49	305

## 1.2 测定项目与方法

1.2.1 光合有效辐射 为避免人为破坏,预留试验区的一部分作为测定区域。在拔节期、抽穗期、灌浆期选择辐射强烈且云层稳定的天气,于中午13:00—14:00使用 AccuPAR 植物冠层分析仪(美国 Meter 公司)进行测定。考虑作物的初生果穗着生点靠近作物地上部中间部位,测定前采用卷尺测量株高确定作物中间测定位置,拔节期测定顶层(离顶部冠层 0.05 m)、中部和底层(离地面 0.05 m),抽穗期及灌浆期测定顶层、穗位层(穗位叶)和底层。垂直方向从地面到冠顶共 3 个测定高度,依照上述步骤划分层次。测定的水平范围为:株间即垂直于行向(南北方向)测定长度为 80 cm,以 20 cm 为长度区间共取 5 个测点;行间与株间测定方法相同,共取 5 个测点。从下到上完成所有位置的采样为一个观测周期,一个处理共测 2 个周期,其中冠层顶部光合有效辐射使用光量子传感器测定。依据测定结果计算下列指标<sup>[11-12]</sup>:

$$IPAR = PAR_{n-1} \times PAR_n$$

$$FIPAR = IPAR / PAR_{n-1}$$

式中,IPAR 为冠层辐射截获量(MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>);PAR<sub>n</sub> 为各层次光合有效辐射(μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>);FIPAR 为冠层辐射截获率(%)。

1.2.2 冠层辐射利用率 测定后将植株取出,按照分层测定地上部生物量,穗单独计重,计算公式<sup>[13]</sup>如下:

$$RUE = B/IPAR$$

式中,RUE 为冠层辐射利用率(g·MJ<sup>-1</sup>);B 为地上部干物质质量(g)。

1.2.3 消光系数 通过 Beer 定律<sup>[12]</sup>计算出消光系数(K):

$$K = -\ln(1 - FIPAR) / LAI$$

式中,LA I 为叶面积指数;FIPAR 为冠层辐射截获率(%)。

## 1.3 数据处理与分析

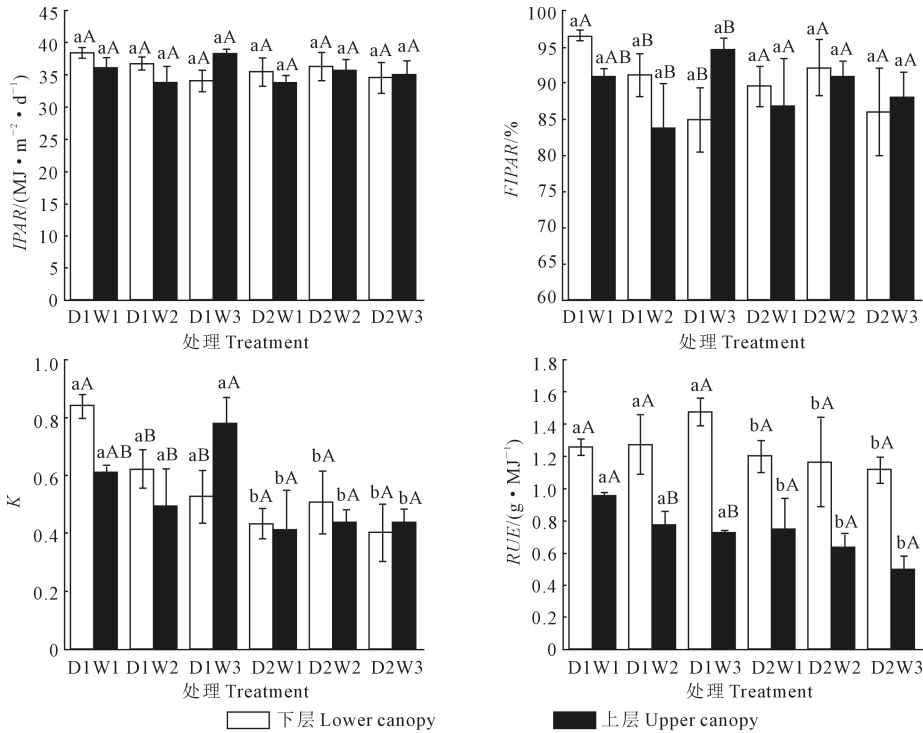
采用 SPSS 19.0、Microsoft Excel 2010 和 Origin18.5 进行数据处理分析和图表绘制,采用 Duncan 法比较处理间的差异(P<0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植密度和土壤水分条件下大田玉米拔节期不同层次冠层的光结构指标

拔节期是玉米冠层发展最快的时期<sup>[14]</sup>,地上部叶片展开速度明显加快,冠层日益旺盛。从拔节期各处理间光结构指标的变化来看(图1),多数处理冠层光结构指标在数值上表现为下部冠层较优,这种现象很大程度上由于拔节期上部叶片尚未完全展开,相比上部冠层,下部冠层能够接收光合有效辐射的叶面积较大,光结构指标优良。但在中度亏水处理下,下部冠层的 IPAR、FIPAR、K 略低于上部冠层,而 RUE 较高,这表明中度亏水使下部冠层光能截获能力下降,但对光合生产能力影响不大。光结构指标中,K 与 RUE 的密度效应更加明显,相同水分条件下,高密度使其值有所降低,不同层次冠层具有规律性,均为下部较高,推测 RUE 出现随密度下降的原因可能是高密度下光合生产能力下降所致,这与范盼盼等<sup>[15]</sup>研究发现密植后相同叶位的光合势降低具有一致性。IPAR 对密度的响应因水分条件不同有所差异,在充分灌水与轻度亏水条件下上部冠层中 IPAR 与密度成反比,下部冠层 IPAR 高于上部冠层,但在中度亏水条件下上部冠层中 IPAR 没有表现出明显的密度效应。与 IPAR 不同,FIPAR 在充分灌水条件下与密度成反比,水分亏缺条件下出现相反的趋势,上、下部冠层中均表现出相同的变化规律。IPAR、FIPAR 能够反映测定范围内冠层对光能的截获能力,而 K 则从群体层面上反映植株对光能截获的情况,上述指标在不同密度下的变化在一定程度上说明了高密度种植不利于群体尺度下部冠层光能截获能力的提升,但从单株尺度上并没有造成明显的冠层光能截获能力的下降。

IPAR、FIPAR、K 受水分亏缺的影响因密度而异,同一密度下上下冠层各指标的变化趋势具有一致性。各指标在同一密度条件下变化规律相同,具体表现为:在低密度下随水分亏缺程度的加重而减小,而高密度条件下随着水分亏缺程度的加重先升高后降低,适当亏水可以促进植株光能截获量及消



注:不同小写字母表示同一水分条件下密度处理间差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示同一密度条件下水分处理间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among density treatments under the same soil water conditions ( $P<0.05$ ). Different capital letters indicate significant differences among water treatments under the same density conditions ( $P<0.05$ ), the same below.

图 1 拔节期大田玉米冠层光结构指标

Fig.1 Canopy light structure indicators at jointing stage of maize

化系数增大。不同密度条件下水分亏缺程度对  $RUE$  影响有差异,低密度时,上、下部冠层表现不同, $RUE$  在下部冠层随水分亏缺程度加重而升高,上部冠层中则相反;高密度条件下, $RUE$  在上、下部冠层中均随水分亏缺程度加重而降低。虽然密植时轻度水分亏缺会增强光能截获的能力,但冠层辐射利用率较低,出现这种现象的原因可能是水分胁迫使得玉米光合生产能力下降<sup>[16]</sup>,同时表明该条件下截获的光能并没有得到很好的利用。

## 2.2 不同种植密度和水分条件下大田玉米抽穗期不同层次冠层的光结构指标

抽穗期,玉米冠层发育趋于完全,从玉米冠层光结构指标的整体变化上来看(图 2),各处理  $IPAR$ 、 $FIPAR$ 、 $K$  依然表现为下部冠层较优,从拔节期至抽穗期,玉米株高呈快速增长趋势,这符合一般规律<sup>[17]</sup>,出现上述现象很大程度上由于穗位高随株高增大高于地上部冠层的中间高度,因此相比上部冠层,下部冠层叶面积指数较大,光结构指标较优。 $RUE$  抽穗期不同于拔节期,总体水平升高近 25%~78%,但上部冠层要高于下部冠层,上述现象在一定程度上反映出虽然冠层光能截获能力增强,

但冠层辐射的利用率却有所下降,这可能是由于穗上部相比穗下部,光热、通风条件更优,穗下部叶片之间遮挡现象严重,导致冠层内部通风不良,不利于光合作用,同时或许与植株内部生物量发生转运有关。各层次冠层光结构指标对密度的响应多在不同水分处理间有差异。在充分灌水处理中,上、下部冠层  $IPAR$  均在高密度下表现较好,而在水分亏缺条件下,下部冠层  $IPAR$  表现出随密度加大而下降的趋势。同一水分条件下,各层次冠层  $FIPAR$  与  $K$  受密度的影响出现不同的趋势, $FIPAR$  随密度增大而增大, $K$  在充分灌溉条件下随密度增大而减小。这在一定程度上说明,密植可以促进单株植物的光能截获能力,但并不利于群体尺度上光合有效辐射截获的改善。各水分处理间光结构指标的变化与拔节期存在较大的差异,该生育阶段  $IPAR$  受水分影响较小, $FIPAR$  在轻度水分亏缺条件下有下降的趋势,但降幅较小,中度亏水处理时  $FIPAR$  较优,造成这种现象的原因可能是生育期内降雨发生在作物冠层生长关键期,降雨相当于一种复水处理,相比其他水分处理,亏水严重时其复水效应更加强烈,因此冠层生长旺盛,一段时间内光合作用

有所增强,从而增强了植株光能截获能力与辐射利用效率。RUE 随水分亏缺程度的变化趋势较明朗,尤其是在下部冠层中差异显著,一致表现为随水分亏缺程度增大而增大,推测这可能与抽穗期进行复水处理有关,穗上部冠层中 D2W1 差异不大。

### 2.3 不同种植密度和土壤水分条件下大田玉米灌浆期不同层次冠层的光结构指标

从光结构指标的变化上来看(图 3),灌浆期高密度条件下各指标受密度与水分影响与拔节期较一致,低密度条件下各指标的变化与抽穗期基本一

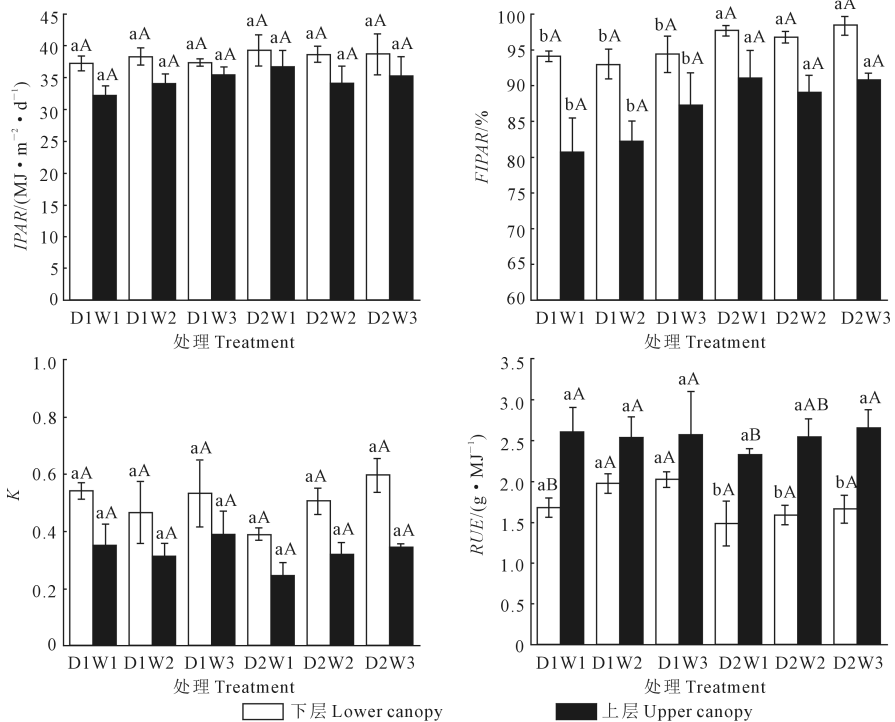


图 2 抽穗期大田玉米冠层光结构指标

Fig.2 Canopy light structure indicators at heading stage of maize

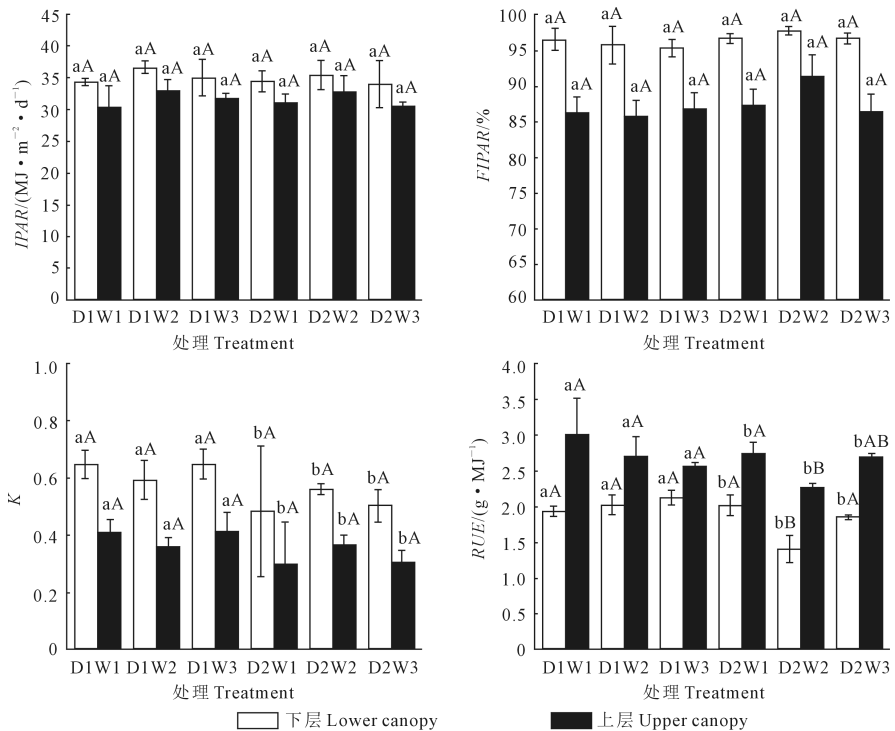


图 3 灌浆期大田玉米冠层光结构指标

Fig.3 Canopy light structure indicators at filling stage of maize

致。不同空间范围上, *IPAR*、*FIPAR* 与 *K* 仍表现为穗下部冠层较高, 但 *RUE* 下部冠层相对较低, 这种现象可能与植株的自下而上的衰老有关, 穗下部叶片衰老发黄, 其生物量降低, 而叶面积没有明显减小, 因此冠层光能截获能力并没有大幅度下降, 但由于叶片衰老截获的光能仅一小部分参与光合作用。

在试验水分处理条件下, 下部冠层 *IPAR* 均随密度增大而减小。上部冠层 *IPAR* 受密度的影响在不同水分条件下有所不同, 充分灌水处理, *IPAR* 随密度增大而增大, 但差异未达显著水平 ( $P>0.05$ ), 而在水分亏缺条件下, 随密度增大而下降, 但差异未达到显著性水平 ( $P>0.05$ )。 *FIPAR* 在上、下冠层中对密度响应一致, 均随密度增大而增大, 与抽穗期变化一致。 *K* 在充分灌水处理中表现出随密度增大而增大, 而在水分亏缺下, 下部冠层中 *K* 随密度增大而减小。 *FIPAR* 与 *K* 的密度效应表明充分灌水条件下增大密度有利于提升光合有效辐射截获率, 水分亏缺与密植可以促进下部冠层中群体光能截获能力的提升。上下部冠层中 *RUE* 对密度的响应并不相同, 上部冠层 *RUE* 随密度增大而减小, 下部冠层 *RUE* 对密度的响应受水分条件的影响, 在充分灌水条件下, 随密度增大而增大, 水分亏缺条件下则随密度增大而减小。充分灌水条件下, *RUE* 在低密度下数值更大, 且穗下部与穗上部的差值随密度的增大而增大, 这是因为植株在密植时下部叶片会加速衰老, 符合上述 *RUE* 降低与植株自下而上衰老有关的推断。高密度下, *IPAR*、*FIPAR* 及 *K* 随水分亏缺程度增强先增大后降低, 且上下冠层表现一致, 一定程度上表明轻度亏水处理可以促进灌浆期冠层光能截获能力的增强。整体上, 充分灌水处理下 *RUE* 值最大, 水分亏缺不利于灌浆期 *RUE* 的提升。

### 3 讨 论

冠层光结构是表征冠层结构的重要因素, 主要表现为冠层光截获能力与光合生产能力的差异<sup>[18-19]</sup>, 因此, 采取适当的农艺措施促进冠层结构的改善有助于生物量的积累。

从各生育期的各项光结构指标来看, 下部冠层中各项光结构指标构建较好, 数值约为上部冠层相同指标的 1.1 倍, 光分布良好。拔节期, *IPAR*、*FIPAR*、*K* 对水分亏缺的响应受密度影响, 同一密度处理不同高度冠层各指标的变化规律相似。低密度下 *IPAR*、*FIPAR*、*K* 随水分亏缺程度的增大而减小, 而高密度条件下, 呈先增大后降低变化趋势, 适当亏水可以促进相关指标增大。中度亏水条件下,

虽然下部冠层光合有效辐射的截获能力降低, 但 *RUE* 较大, 说明中度亏水使下部冠层光能截获能力下降, 但对光合生产能力有所提升。光结构指标中, *K* 与 *RUE* 的密度效应更加显著, 相同水分条件下, 高密度使其值有所降低, *RUE* 出现随密度增大而下降的现象可能是高密度下冠层的光合生产能力下降所致; 范盼盼<sup>[20]</sup>发现密植能够降低相同叶位的光合势, 这一发现能够解释 *RUE* 在密植时下降。 *IPAR* 与 *FIPAR* 对密度的响应在不同水分处理间存在差异, 充分灌水与轻度水分亏缺下, 上部冠层 *IPAR* 及 *FIPAR* 随密度增大而降低, 下部冠层差异不明显。上述指标变化反映出高密度种植不利于群体尺度下部冠层光能截获能力的提升, 但从单株尺度上并没有造成明显的冠层光能截获能力的下降。与拔节期相比, 抽穗期下部冠层 *RUE* 降低, 在一定程度上反映出虽然冠层光能截获能力增强, 但冠层辐射的利用率却有所下降, 这可能是穗上部比穗下部光热、通风条件更优, 穗下部叶片之间遮挡严重, 导致冠层内部通风不良, 不利于进行光合作用<sup>[21]</sup>。种植密度与水分的耦合作用对各层次冠层光结构指标影响较大, 低密度下进行轻度水分亏缺处理相对改善了冠层光分布, 水分对光结构指标的影响大大减弱, 作物在密植后, 适宜进行充分灌溉以形成良好的光分布。

### 4 结 论

1) 受冠层生长影响, 与上部冠层相比, 大田玉米下部冠层在生长中期各项光结构指标较优, 数值约为上部冠层的 1.1 倍, 光分布均匀。

2) 整体上来看, 增大种植密度增强了作物冠层光能截获能力, 光合有效辐射截获率抽穗期~灌浆期较低密度条件下升高 0.40%~4.67%, 但会引起群体尺度上光结构的明显劣化, 消光系数 (*K*) 约为低密度条件下的 83%, 光合有效辐射在冠层内的衰减不均衡。

3) 随生育期的推进, 冠层光结构受水分条件的影响较大, 水分亏缺引起辐射利用率降低约 50%, 因此, 为改善大田玉米冠层光结构, 在较小的增密范围内确保生育中后期的充分供水对提升作物光合生产能力十分重要。

#### 参 考 文 献:

- [1] 杨震. 玉米进口解决我国玉米产需缺口研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2019.
- [2] 康绍忠, 粟晓玲, 沈清林, 等. 石羊河流域水资源利用与节水农业发展模式的战略思考[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(4): 1-8.

- [3] Monsi M, Saeki T. On the factor light in plant communities and its importance for matter production [J]. *Annals of Botany*, 2005, 95(3): 549-567.
- [4] 刘建栋, 于强, 闵庆文, 等. 水分胁迫对黄淮海夏玉米农业气候资源利用的影响——II. 水分胁迫对区域生产力影响 [J]. *资源科学*, 2002, 2002(3): 92-95.
- [5] 徐文娟. 不同种植密度条件下玉米生长发育对光照强度的响应 [D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
- [6] Pirkouhi M G, Nobahar A, Dadashi A. Effects of variety, planting pattern and density of plant phenology traits basil plants (*Ocimum basilicum* L.) [J]. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2012, 4(17): 1221-1227.
- [7] 王洪君, 王楠, 胡宇, 等. 半干旱区玉米行距调整增密对群体冠层结构及产量的影响 [J]. *玉米科学*, 2018, 26(6): 75-78.
- [8] Maddonni G A, Otegui M E, Cirilo A G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation [J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(3): 183-193.
- [9] 李华龙, 窦子荷, 蒋腾聪, 等. 水分胁迫对冬小麦冠层辐射截获率和利用效率的影响 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 226-237.
- [10] 郭晓旭. 不同密度下水分亏缺对西北旱区制种玉米生长和耗水的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [11] Hipps L E, Asrar G, Kanemasu E T. Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat [J]. *Agricultural Meteorology*, 1983, 28(3): 253-259.
- [12] Ruiz R, Bertero H. Light interception and radiation use efficiency in temperate quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars [J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 29: 144-152.
- [13] Monteith J L, Moss C J. Climate and the efficiency of crop production in Britain [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, 1977, 281(980): 277-294.
- [14] 荣旭, 李宗毅, 李英豪, 等. 管渠灌溉对夏玉米产量及水分利用效率的影响 [J]. *节水灌溉*, 2020, (2): 46-50, 56.
- [15] 范盼盼, 谢瑞芝, 明博, 等. 基于不同叶位受光条件的玉米冠层光合生产能力分析 [J]. *玉米科学*, 2017, 25(5): 68-72.
- [16] 赵晖, 李尚中. 水分胁迫对全膜双垄沟播玉米光合等生理特性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(5): 85-89.
- [17] 刘婷婷, 滕元旭, 杨涛, 等. 玉米 I 棉花的作物生理特性及根系特征研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(6): 160-165.
- [18] 郭江, 肖凯, 郭新宇, 等. 玉米冠层结构、光分布和光合作用研究综述 [J]. *玉米科学*, 2005, (2): 55-59.
- [19] Song Q F, Wang Y, Qu M G, et al. The impact of modifying photosystem antenna size on canopy photosynthetic efficiency [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2017, 40: 2946-2957.
- [20] 范盼盼. 先玉 335 冠层结构与功能对种植密度的响应及其氮素效应 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [21] 杨其镔. 密度和水分亏缺对制种玉米生长与籽粒特征的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2019.

(上接第 252 页)

4) 供试品种中, 轮选 103、婴泊 700、石麦 26 的产量均在  $7\ 500\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  以上, 水分利用效率在  $2\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  左右。综合考虑抗旱能力、籽粒产量以及作物水分利用效率, 此 3 个小麦品种适宜在河北省平原区进行推广种植。

#### 参考文献:

- [1] 吴金芝. 冬小麦不同抗旱性品种光合、物质运转和水分利用特征 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [2] 徐恒永, 赵君实. 高产冬小麦的冠层光合能力及不同器官的贡献 [J]. *作物学报*, 1995, 21(2): 204-209.
- [3] 张继波, 薛晓萍, 李楠, 等. 水分胁迫对扬花期冬小麦光合特性和干物质生产及产量的影响 [J]. *干旱气象*, 2019, 37(3): 447-453.
- [4] 袁蕊, 李萍, 胡晓雪, 等. 干旱胁迫对小麦生理特性及产量的影响 [J]. *山西农业科学*, 2016, 44(10): 1446-1449.
- [5] 曹彩云, 党红凯, 郑春莲, 等. 不同灌溉模式下小麦荧光特征及品种抗旱性研究 [J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(11): 1434-1444.
- [6] 吴金芝, 王志敏, 李友军, 等. 不同冬小麦品种旗叶叶绿素荧光特性及其对干旱的响应 [J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(5): 699-706.
- [7] 郭瑞, 周际, 杨帆, 等. 拔节孕穗期小麦干旱胁迫下生长代谢变化规律 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(12): 1319-1327.
- [8] 杨晓青, 张岁岐, 梁宗锁, 等. 水分胁迫对不同抗旱类型冬小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响 [J]. *西北植物学报*, 2004, 24(5): 812-816.
- [9] 周玲, 王朝辉, 李富翠, 等. 不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析 [J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4123-4131.
- [10] 吴金芝, 王志敏, 李友军, 等. 干旱胁迫下不同抗旱性小麦品种产量形成与水分利用特征 [J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(6): 25-35.
- [11] 巩攀柱, 吕金印, 徐炳成, 等. 水分胁迫和种植方式对小麦叶绿素荧光参数及水分利用效率的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(5): 83-87, 92.
- [12] 项超, 徐智斌, 冯波, 等. 四川小麦品种的旗叶光合特性 [J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(1): 84-89.
- [13] 董浩, 毕军, 夏光利, 等. 灌溉和种植方式对冬小麦生育后期旗叶光合特性及产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2259-2266.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 32136-2015 农业干旱等级 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [15] Xue Q W, Zhu Z X, Musick J T, et al. Physiological mechanisms contributing to the increased water-use efficiency in winter wheat under deficit irrigation [J]. *Journal of plant physiology*, 2006, 163(2): 154-164.
- [16] 王丽华, 左师宇, 曹鑫波, 等. 不同类型小黑麦产量形成的光合特性差异 [J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(10): 1334-1342.
- [17] 曹树青, 赵永强, 温家立, 等. 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.
- [18] 褚鹏飞, 于振文, 王东, 等. 耕作方式对小麦开花后旗叶水势与叶绿素荧光参数日变化和水分利用效率的影响 [J]. *作物学报*, 2012, 38(6): 1051-1061.
- [19] Zhang Y P, Zhang Y H, Wang Z M, et al. Characteristics of canopy structure and contributions of non-leaf organs to yield in winter wheat under different irrigated conditions [J]. *Field Crops Research*, 2011, 123(3): 187-195.
- [20] 冯波, 李华伟, 王法宏, 等. 小麦非叶器官的光合特性及其对籽粒产量的贡献 [J]. *植物生理学报*, 2019, 55(1): 32-40.
- [21] Wang Y Q, Xi W X, Wang Z M, et al. Contribution of ear photosynthesis to grain yield under rainfed and irrigation conditions for winter wheat cultivars released in the past 30 years in North China Plain [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(10): 2247-2256.