

# 覆盖栽培模式对冬小麦花后旗叶 光合特性及产量的影响

陈影慧<sup>1</sup>,程宏波<sup>1</sup>,刘媛<sup>1</sup>,常磊<sup>2</sup>,柴守玺<sup>2</sup>,杨德龙<sup>1</sup>

(1.甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学生命科学技术学院,甘肃兰州730070;2.甘肃农业大学农学院,甘肃兰州730070)

**摘要:**为探究旱地小麦秸秆带状覆盖栽培增产的光合特性和干物质积累转运的特征,在甘肃省半干旱雨养农业区以“陇中2号”为材料,研究了秸秆带状覆盖栽培(BS)、地膜覆盖栽培(PF)和无覆盖露地栽培(CK)3种栽培模式下冬小麦花后旗叶光合特征、叶绿素荧光动力学参数、干物质积累转运及产量的差异。结果表明:与CK相比,BS和PF显著提高了花后旗叶光合势、叶绿素和类胡萝卜素含量及叶绿素/类胡萝卜素比率,且BS在生育后期优于PF。BS整个生育期的净光合速率、气孔导度均高于CK,而PF仅生育前期发挥正效应,生育中、后期出现了负效应。BS生育前中期胞间CO<sub>2</sub>浓度、生育中后期旗叶瞬时水分利用效率均高于PF和CK,前者分别高出2.8%~8.2%和6.7%~11.3%,后者分别高出30.3%~44.8%和27.5%~39.3%。PF在灌浆中期以前,BS在整个花后生育期显著提高了小麦花后旗叶 $F_v/F_m$ 、 $F'_v/F'_m$ 、 $\Phi PS II$ 、 $qP$ 、 $ETR$ ,降低了NPQ。BS较PF和CK显著提高了花后干物质输入籽粒量和对籽粒粒重的贡献率,2个指标分别增加2.6%、1.0%和14.2%、8.6%。BS显著增加了单位面积穗数,提高了产量,较CK增产35.4%。说明秸秆带状覆盖能显著改善旱地冬小麦花后光合效率,促进干物质积累转运,从而达到增产的效果。

**关键词:**秸秆带状覆盖;冬小麦;光合特性;叶绿素荧光动力学参数;干物质积累转运;产量

**中图分类号:**S512.1<sup>+</sup>1;S343.1 **文献标志码:**A

## Effect of covering on photosynthetic characteristics of flag leaf during post-anthesis and yield in winter wheat

CHEN Ying-hui<sup>1</sup>, CHENG Hong-bo<sup>1</sup>, LIU Yuan<sup>1</sup>, CHANG Lei<sup>2</sup>, CHAI Shou-xi<sup>2</sup>, YANG De-long<sup>1</sup>

(1. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science /College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** In order to accurately understand the characteristics of photosynthesis and accumulation and remobilization of shoot dry matter for yield improvement of dryland wheat grown under bundled-straw covering condition, a wheat cultivar of Longzhong 2 was used as material to determine differences in photosynthesis of flag leaf, chlorophyll fluorescence dynamic parameters, accumulation and remobilization of shoot dry matter during post-anthesis and grain yield among the different treatments including bundled straw covering cultivation (BS), plastic film mulching cultivation (PF) and cultivation without any covering (CK) in the semiarid rain-fed region of Gansu Province. The result showed that BS and PF significantly improved photosynthetic potential, chlorophyll and carotenoid content, and ratio of chlorophyll to carotenoid of flag leaf during post-anthesis, compared with CK. The effects of BS was more remarkable than those of PF, especially in the late growth period. The leaf photosynthetic rate and stomatal conductance were higher under BS than that under CK during the whole growth stage. In this case, PF just showed positive effects in earlier growth stage, but negative effects in mid-later growth stage. The intercellular CO<sub>2</sub> concentration in early and middle stage and the instantaneous water use efficiency in mid-later growth stage under BS were higher than those under both PF and CK. The former increased by 2.8%~8.2% and 6.7%~11.3%, re-

收稿日期:2018-06-12

修回日期:2019-05-10

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(18JR3RA173);甘肃农业大学盛彤笙基金项目(GSAU-ST5-1536);国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-3-2-49);甘肃省现代农业产业技术体系项目(GARS-01-04)

作者简介:陈影慧(1989-),女,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为小麦抗旱生理。E-mail: 2503929617@qq.com

通信作者:杨德龙(1975-),男,教授,博士生导师,主要从事小麦抗旱生理研究。E-mail: yangdl@gsau.edu.cn

spectively, while the latter increased by 30.3%~44.8% and 27.5%~39.3%, respectively. The  $F_v/F_m$ ,  $F'_v/F'_m$ ,  $\Phi_{PSII}$ ,  $qP$  and  $ETR$  of flag leaf increased but the  $NPQ$  decreased before the middle grain-filling stage under PF and during the whole growth period under the BS. Compared with both PF and CK, BS significantly raised the input amount of dry matter to kernels by 2.6% and 1.0% and the contribution rate to grain weight by 14.2% and 8.6% during post-anthesis, respectively. BS greatly increased spike number per unit area and thus enhanced yield by 35.4%. It was indicated that BS treatment could significantly improved photosynthetic efficiency and accumulation and transportation of dry matter, and consequently increased grain yield of dryland winter wheat.

**Keywords:** bundled-straw cover; winter wheat; photosynthetic performance; kinetic parameters of chlorophyll fluorescence; dry matter accumulation and translocation; yield

我国西北属于中温带半干旱雨养区,降水稀少且时空分布不均,水分亏缺致使作物产量低而不稳<sup>[1-2]</sup>。光合作用是物质同化和产量形成的重要生理基础,叶绿素荧光参数反映光能利用的能力和水平,两者均受遗传和环境条件的影响。在半干旱雨养农业区,作物生育期内水分需求与自然降雨季节错位或降雨量的不均匀分布导致的干旱胁迫,加速了作物叶片衰老,光合色素降解,光能转换效率降低<sup>[3-4]</sup>,气孔阻力增大,胞间  $CO_2$  浓度降低,净光合速率下降<sup>[5]</sup>;PS II 放氧复合体 OEC 受损和  $D_1$  蛋白降解,电子传递受阻<sup>[6]</sup>;光合生理期缩短,不利库源关系协调发展,最终导致减产<sup>[7]</sup>。因此,在选育和推广优良抗旱作物品种的基础上,研发旱作高效栽培技术,提高作物光合能力和水分利用效率,是实现作物高产稳产的有效途径之一。

覆盖栽培是提高农作物生产效率的重要措施之一,其材料多采用塑料薄膜和作物秸秆。塑料薄膜覆盖能显著防止土壤水分蒸发,提高土壤的保水能力,但易造成土壤通气性、降水入渗补给性变差,不利根系形态建成,阻碍水分及矿质元素吸收,且干热季节增温效应导致作物早衰<sup>[8]</sup>。作物覆盖栽培中秸秆富含 C、N、P 和 K 等元素,可“以秆代肥”增加土壤有机质,协调养分供应<sup>[9]</sup>;还可减轻土壤压实度和增加孔隙度,改善土壤“水库调蓄”,抑制土壤和棵间蒸发<sup>[10]</sup>。但常规秸秆覆盖下,土壤含水量较高造成作物前期生长冗余,初期不利积温影响出苗和生长,部分条件下作物减产<sup>[11]</sup>。因此,秸秆覆盖优化改良是农业生产和发展的需要。

秸秆带状覆盖是一种利用秸秆局部覆盖、抗旱保墒的栽培新技术。该技术“种的地方不覆、覆的地方不种”,即覆盖带和种植带相间排列<sup>[12]</sup>。它在一定程度上缓和了季节间、昼夜间土壤温度的激变<sup>[13-14]</sup>,改善小麦播种至拔节期 0~200 cm 土层土壤墒情,显著增加土壤耗水量,提高水分利用效率<sup>[15-16]</sup>,与常规秸秆全覆盖相比凸显边际优势<sup>[17]</sup>。

前期研究发现,冬小麦秸秆带状覆盖栽培较露地栽培增产 37.0%~69.1%<sup>[12,18]</sup>,在西北雨养农业区有很好的推广应用前景。针对其增产原因,前人多倾向于秸秆带状覆盖改善土壤和植株水分和温度的研究,光合生理机制等方面的研究鲜见报道。因此,本研究设计 3 种栽培模式,通过分析各模式间旱地小麦旗叶的光合参数、叶绿素荧光动力参数、干物质积累转运及产量的差异,明确秸秆带状覆盖对小麦旗叶光合能力和产量形成的影响,旨在为秸秆带状覆盖栽培技术的推广和应用提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2016 年 9 月~2017 年 7 月在甘肃省通渭县现代旱作循环农业试验示范基地进行,该基地地处黄土高原南部的连绵地带,为黄土丘陵沟壑区,属温带半湿润半干旱性季风气候。平均海拔 1 776.5 m,年平均气温 6.6℃,温差较大,无霜期 120~170 d,年降雨量 380 mm 左右,年蒸发量 >1 500 mm,2016 年 9 月~2017 年 7 月有效降雨为 159.2 mm(图 1)。

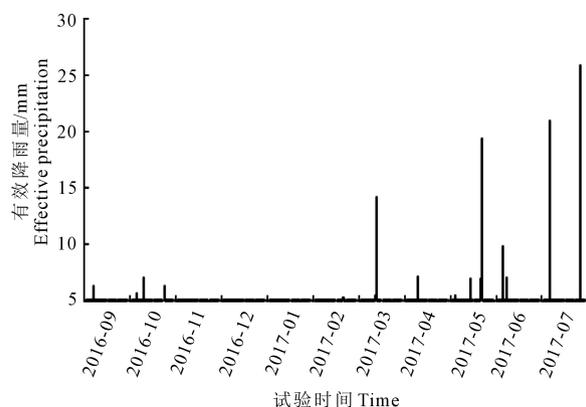


图 1 2016 年 9 月~2017 年 7 月试验区降水分布

Fig.1 Distribution of precipitation in the experimental field from Sept. 2016 to July 2017

## 1.2 材料与处理方法

以旱地小麦品种“陇中 2 号”为供试材料,采用完全随机设计分别布置秸秆带状覆盖(BS)、地膜覆盖(PF)和无覆盖露地种植(CK)3种处理,每个处理3次重复。每个处理的小区面积7.2 m×40 m,试验总面积2 592 m<sup>2</sup>。BS处理的播种带宽70 cm、密植5行,覆盖带宽40 cm,总幅宽110 cm,将玉米整株秸秆铺于种植带之间,秸秆用量约52 500株·hm<sup>-2</sup>;PF处理的地膜平铺于整个地面,用土压膜;CK处理的播种行距17 cm,播后耧平。各处理均采用条播,播种深度5 cm,播量225 kg·hm<sup>-2</sup>;在2016年播前施基肥(施纯氮150 kg·hm<sup>-2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>120 kg·hm<sup>-2</sup>),生育期内不施肥;生育期内依靠自然降水,按常规大田进行管理。

2016年9月25日播种,BS、PF和CK处理的小麦成熟期分别为2017年7月15日、2017年7月8日和2017年7月10日。

## 1.3 测定项目与方法

各小区在小麦开花期(2017-05-30)、灌浆前期(2017-06-08)、灌浆中期(2017-06-15)、灌浆后期(2017-06-21)和乳熟期(2017-06-28),随机选取长势一致的30株带主茎的小麦旗叶,进行如下指标测定。

(1)分别测定各处理小麦旗叶长和宽,并计算光合面积和光合势<sup>[19-20]</sup>。其中,旗叶面积( $S$ )=叶长( $L_1$ )×叶宽( $L_2$ )×0.83;光合势=(前一时叶面积 $S_1$ +后一时叶面积 $S_2$ )×0.5×前后时期间隔天数,求平均值。

(2)旗叶光合色素测定:采用80%丙酮浸提法<sup>[21]</sup>浸提和测定各处理小麦旗叶叶绿素a(Chla)、叶绿素b(Chlb)、总叶绿素(Chl)和类胡萝卜素(Car)含量,并计算Chl/Car比值。以上测定重复3次,求平均值。

(3)旗叶光合参数测定<sup>[22]</sup>:于晴天9:00-11:30采用Li-6400XT便携式光合作用测定系统(Li-Cor, USA)配置叶室6400-11测定小麦旗叶光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ ),每处理重复3次,计算瞬时水分利用效率 $WUE_i = P_n / T_r$ 。

(4)旗叶叶绿素荧光参数测定<sup>[23]</sup>:用Li-6400XT配置荧光叶室6400-40,于晴天9:00-11:30测定光合标记的充分光活化后的小麦旗叶最小初始荧光( $F'_o$ )、最大荧光( $F'_m$ )、稳态荧光( $F_s$ );测定充分暗处理后的初始荧光( $F_o$ )、最大荧光( $F_m$ )。PS II最大光化学效率 $F_v/F_m = (F_m - F_o) /$

$F_m$ ,光下最大光化学效率 $F'_v/F'_m = (F'_m - F'_o) / F'_m$ ,实际光化学效率 $\Phi_{PSII} = (F'_m - F'_s) / F'_m$ ,光化学淬灭系数 $qP = (F'_m - F'_s) / (F'_m - F'_o)$ ,非光化学淬灭系数 $NPQ = (F_m - F'_m) / F_m$ ,PS II电子传递速率 $ETR = 0.5 \times \alpha \times \Phi_{PSII} \times PPFD$ (其中,PPFD为光量子通量密度, $\alpha$ 为小麦吸光系数, $\alpha = 0.87$ )。

(5)干物质重测定:每小区于开花期和成熟期分别随机收取具有代表性的主茎植株样本50株进行器官分离,开花期分为叶、茎和穗3个部分,成熟期分为叶、茎、颖壳+穗轴、籽粒4部分,105℃杀青,80℃烘至恒重,测定干物质,计算单株平均值。计算公式<sup>[24]</sup>如下:

营养器官花前干物质转运量(g) = 开花期营养器官干重 - 成熟期营养器官干重;

营养器官花前干物质转运率(%) = 营养器官花前干物质转运量 / 开花期营养器官干重 × 100;

营养器官花前贮藏同化物对籽粒产量的贡献率(%) = 营养器官花前干物质转运量 / 成熟期干重 × 100;

花后同化物输入籽粒量(g) = 成熟期籽粒干重 - 营养器官花前转运量;

花后干物质积累量对籽粒产量的贡献率(%) = 花后同化物输入籽粒量 / 成熟期籽粒干重 × 100。

(6)考种:小麦成熟后每小区随机选取长势均匀的3个样方(每样方面积为1 m<sup>2</sup>),将样方内所有小麦植株沿其根茎结合处剪下,取地上部分进行考种;其余按区全部实收、单独脱粒,并折算产量。

## 1.4 数据处理

数据采用SPSS 19.0统计软件进行分析,用LSD法进行显著性差异检验,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同覆盖处理对旱地小麦旗叶光合势的影响

由图2可知,与CK相比,覆盖处理显著提高了旱地冬小麦花后旗叶光合势,但BS与PF处理在FS-EGS和TGS-MS差异不显著,而在EGS-MGS和MGS-TGS达到显著差异水平( $P < 0.05$ ,下同),且均表现为BS>PF>CK,其中,BS处理较CK和PF处理分别提高了16.65%、22.49%和6.74%、12.05%。说明BS处理显著提高旱地小麦旗叶光合势,且灌浆期提高幅度高于PF处理,更利于叶片光能捕获和干物质生产。

### 2.2 不同覆盖处理对旱地小麦旗叶光合色素的影响

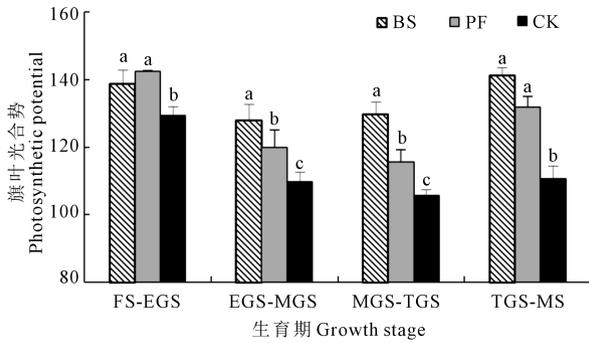
旱地小麦花后生育期旗叶Chla和Chlb含量先

升高后降低,灌浆中期 Chla 和 Chlb 含量最高,Chl/Car 比值变化趋势与之相同,但 Car 含量变化趋势与之相反(图3)。各处理间,开花期和灌浆前期小麦旗叶 Chla 和 Chlb 含量差异不显著,但灌浆中期及以

后各处理间差异显著,具体表现为灌浆中期 BS>PF>CK,灌浆后期和乳熟期 BS>CK>PF,其中,BS 较 PF 高出 1.1~1.6 mg·g<sup>-1</sup>,较 CK 高出 1.3~1.7 mg·g<sup>-1</sup>(图3(A)、3(B))。除灌浆中期外,小麦花后生育期旗叶 Car 含量表现为 BS>CK>PF,BS 与 CK 处理间差异不显著,但 BS 显著高于 PF,且灌浆后期以后 CK 亦显著高于 PF(图3(C))。开花期和灌浆前期 Chl/Car 比值表现为 PF>BS>CK,BS 与 PF、CK 处理间差异均不显著;灌浆中期以后 Chl/Car 比值表现为 BS>CK>PF,且 BS 处理显著高于 PF 和 CK,分别高出 32.4%~71.4%和 23.5%~47.4%(图3(D)),表明 BS 处理能显著减缓灌浆中期以后叶绿素降解速度,利于生育后期光合效率的提高。

### 2.3 不同覆盖处理对旱地小麦旗叶光合参数的影响

不同覆盖处理下,旱地冬小麦花后旗叶  $P_n$  和  $G_s$  均呈现先升高后降低的变化趋势,PF 处理在灌浆前期达到峰值,BS 和 CK 处理在灌浆中期达到峰值(图4(A)、4(B))。在生育前期,PF 处理的旗叶  $P_n$  和  $G_s$  显著高于 CK,但在生育中、后期低于 CK,而 BS 处理在整个生育期内均高于 CK,PF 和 BS 较 CK 分别高出 6.2%~37.3%和 4.5%~54.7%,表明覆盖能提高旗叶  $P_n$  和  $G_s$ ,且 BS 处理的正效应贯穿于小麦整



注:FS:开花期;EGS:灌浆前期;MGS:灌浆中期;TGS:灌浆后期;MS:乳熟期,不同小写字母表示相同生育期内处理间有显著差异( $P<0.05$ ),下同。

Note: FS: Flowering stage; EGS: Early grain-filling stage; MGS: Middle grain-filling stage; TGS: Terminal grain-filling stage; MS: Milk stage. Different lowercase letters indicated significant difference among treatments at the same growth stage at  $P=0.05$  level. The same below.

图2 不同覆盖处理下旱地冬小麦花后旗叶光合势

Fig.2 Effects of different covering models on photosynthetic potential of flag leaves during post-anthesis of dryland winter wheat

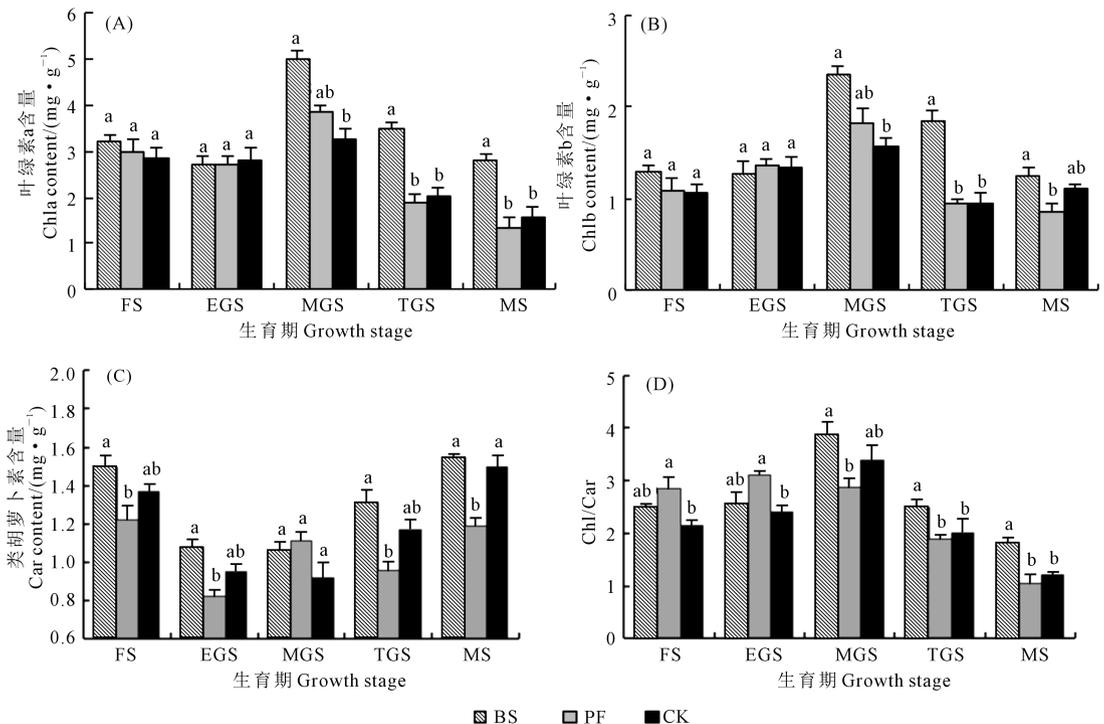


图3 不同覆盖处理下旱地冬小麦花后旗叶光合色素变化

Fig.3 Effects of different covering models on photosynthetic pigments of flag leaves during post-anthesis of dryland winter wheat

个花后生育期,而 PF 处理在生育前期发挥正效应,但生育中、后期出现了负效应,即 BS 处理在改善小麦旗叶  $P_n$  和  $G_i$  方面较 PF 更具优势。

不同处理旱地小麦花后旗叶  $C_i$  先急剧上升后缓慢下降,并最终维持较高水平(图 4(C))。从开花期到灌浆后期  $C_i$  变化基本可以反映小麦  $P_n$  变化趋势(图 4(A)、4(C))。各处理间,开花期、灌浆前期和灌浆中期的  $C_i$  变化表现为 BS 处理显著高于 PF 和 CK,分别高出 2.8%~8.2%和 6.7%~11.3%,但其他生育期处理间均无显著差异,说明与其他 2 种栽培模式相比,BS 显著提高了生育前、中期  $C_i$ ,保证了小麦气孔限制条件下光合化所需的  $CO_2$  供应。

在不同的覆盖处理下旱地小麦花后旗叶  $WUE_i$  均呈现先升后降的趋势,灌浆后期最低,之后又逐渐上升(图 4(D))。各处理间,开花期、灌浆前期旗叶  $WUE_i$  无显著差异,但灌浆中期、灌浆后期和乳熟期 BS 处理的旗叶  $WUE_i$  显著高于 PF 和 CK,分别高出 30.3%~44.8%和 27.5%~39.3%,表明 BS 处理显著提高了小麦生育中、后期的旱地小麦旗叶  $WUE_i$ 。

#### 2.4 不同覆盖处理对旱地小麦旗叶光化学效率和荧光淬灭参数的影响

由图 5 可知,各处理开花期旱地小麦旗叶  $F_v/F_m$ 、 $F'_v/F'_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$ 、 $NPQ$  和  $ETR$  均低于其他各个时期,且 BS 和 PF 处理下的  $F_v/F_m$ 、 $F'_v/F'_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$  和  $ETR$  均高于 CK 处理,而  $NPQ$  低于 CK,但处理间差异不显著。灌浆前期和中期的旗叶  $F_v/F_m$ 、 $F'_v/F'_m$

$F'_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$  和  $ETR$  均表现为  $PF > BS > CK$ ,而  $NPQ$  表现与之相反,灌浆前期各处理间差异显著,灌浆中期 BS 与 CK 处理间差异不显著,但 PF 与 CK 处理间差异显著,说明与 CK 相比灌浆前期和中期 BS 和 PF 处理均可增加 PS II 反应中心原初光能捕获效率、光能转化效率,减少热能耗散,提高电子传递量,使之产生更多的 ATP 和 NADPH 用于碳同化,且该时期此效应 PF 处理优于 BS。灌浆后期和乳熟期 BS 处理的  $F_v/F_m$ 、 $F'_v/F'_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$  和  $ETR$  均高于 PF 和 CK,而  $NPQ$  低于 PF 和 CK,且乳熟期 PF 与 CK 相比出现负效应。以上结果表明,覆盖栽培(PF 灌浆中期以前,BS 整个花后生育期)与无覆盖露地栽培相比,提高了旱地小麦花后旗叶  $F_v/F_m$ 、 $F'_v/F'_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$  和  $ETR$ ,降低了热耗散  $NPQ$ ,使更多能量用于推动光化学反应的进行。

#### 2.5 不同覆盖处理对旱地小麦花前贮藏同化物再转运和花后同化的影响

由表 1 可知,在不同的覆盖处理下,旱地小麦花前各器官干物质转运量大小表现为茎>叶>穗轴+颖壳,干物质转运率表现为叶>茎>穗轴+颖壳。与 CK 相比,BS 和 PF 处理增加了叶干物质转运量,降低了茎、穗轴+颖壳干物质转运量,同时增加了叶、茎干物质转运率。各处理间花前干物质转运率、花前干物质转运量及其对籽粒贡献率均表现为  $BS < PF < CK$ ,但花后干物质输入籽粒量及其籽粒贡献率和籽粒重表现均与之相反,且 BS 处理的花后干物质输入

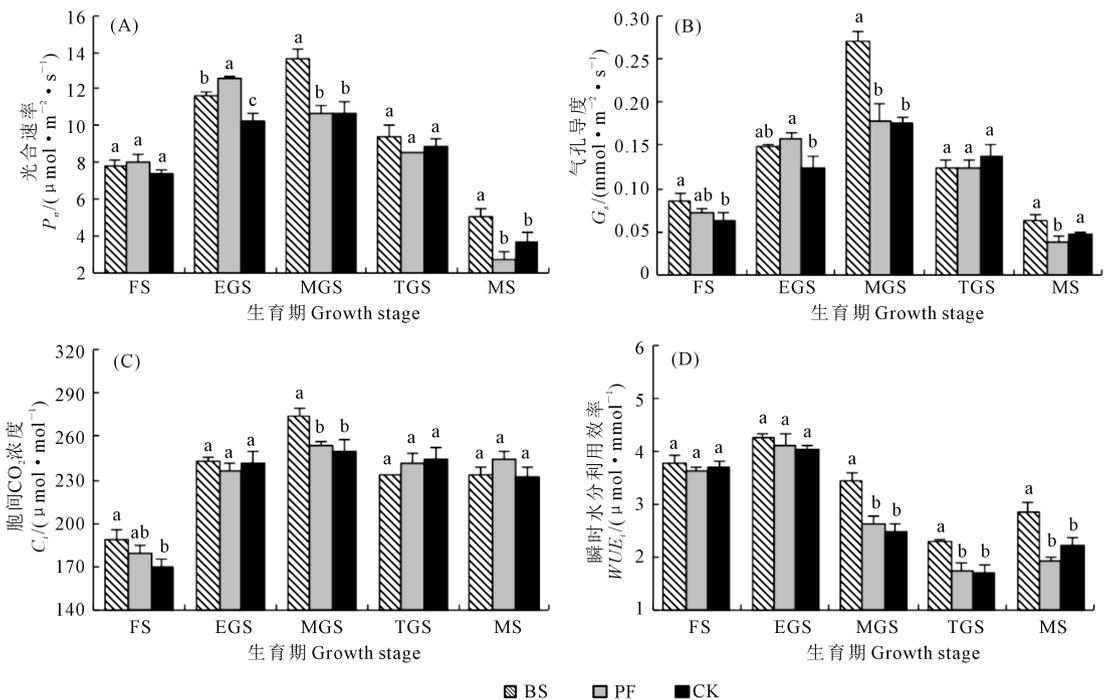


图 4 不同覆盖处理下旱地冬小麦花后旗叶光合参数

Fig.4 Effects of different covering models on photosynthesis of flag leaves during post-anthesis of dryland winter wheat

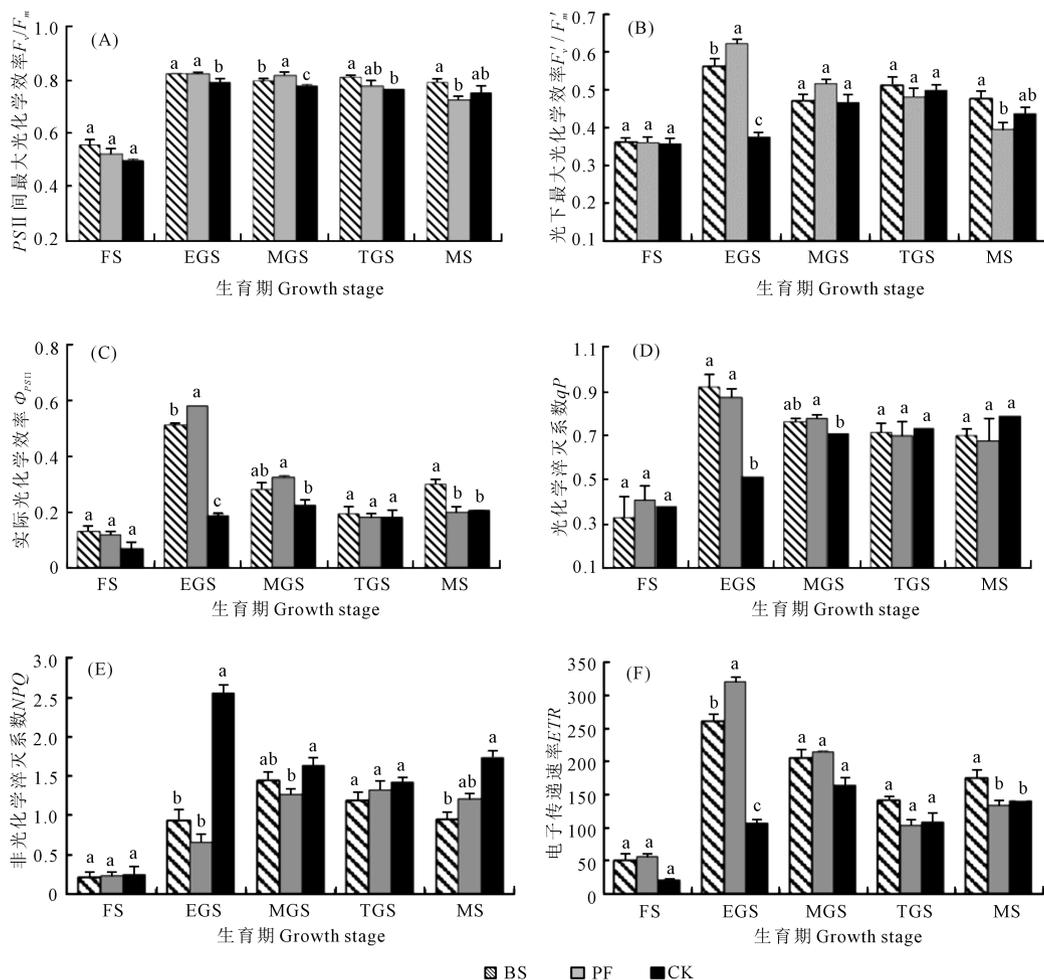


图5 不同覆盖处理下旱地冬小麦花后旗叶叶绿素荧光参数

Fig.5 Effects of different covering models on chlorophyll fluorescence parameters of flag leaves during post-anthesis of dryland winter wheat

籽粒量、花后籽粒贡献率较 PF 和 CK 分别高出 2.6%、1.0%和 14.2%、8.6%;另外,花后干物质积累量对籽粒贡献率显著高于花前贡献率,即花后的干物质积累是籽粒干物质的主要来源。以上表明,与其它两种栽培方式相比,BS 处理虽减少了植株开花前贮藏干物质转运量和转运率,但提高了其花后干物质积累能力,增加了籽粒重和籽粒来自花后干物质的比例,为其增产奠定了物质基础。

### 2.6 不同覆盖栽培处理对旱地小麦产量及产量构成因素的影响

由表 2 知,不同覆盖栽培模式下产量表现为 BS > PF > CK,BS 与 PF 间差异不显著,与 CK 间差异显著,较 CK 增加了 35.4%,表明覆盖栽培在一定程度上提高了产量,且 BS 增产幅度大于 PF。就产量构成因素而言,处理间穗粒数和千粒重差异均不显著,但 BS 处理的单位面积穗数显著高于 PF 和 CK,分别高出 46.2%和 59.6%,表明 BS 的增产是单位面积穗数增加的结果。

## 3 讨论

适宜的土壤环境是保证小麦叶片光合同化顺利进行的关键要素<sup>[25]</sup>,覆盖能降低土壤表面蒸发量、改善土壤温度和土壤墒情,提高作物水分的利用效率,并调节土壤水分在小麦不同生育期的分配<sup>[26]</sup>。本试验对不同栽培模式下旱地冬小麦旗叶光合势研究显示处理间规律为 BS > PF > CK,其中 PF 处理作用效果不显著,而 BS 在灌浆中后期和灌浆后~乳熟期作用效果显著,较 CK 分别提高了 22.5%和 27.4%,说明 BS 可以提高光合潜能,究其原因可能是 BS 保证了相对充足的土壤水分条件,故而植物无须为较少蒸腾而减少叶面积,也可能与水分参与的植物内源激素运输和分配有关<sup>[27]</sup>。同时,相对充足的土壤水分条件保证了土壤 N 素向植物体的供应,从而提高了旱地小麦旗叶叶绿素合成量<sup>[28]</sup>,使其具备了捕获光能和传递光能的潜力,为光合同化奠定了物质基础,这对提高功能叶对光能的利用率有积极作用。

表 1 不同覆盖处理下旱地冬小麦花前贮藏同化物再转运和花后同化

Table 1 Effects of different covering models on remobilization of pre- and post-anthesis stored assimilates of dryland winter wheat

处理 Treatment	器官 Organ	各器官单 株转运量 TA/g	各器官 转运率 TR/%	单株花前干 物质转运量 TApre/g	花前干物质 转运率 TRpre/%	单株籽 粒重 GM/g	花前干物质 转运量对籽 粒产量 贡献率 CRpre/%	单株花后干 物质输入籽 粒量 TApost/g	花后干物质 积累量对籽 粒产量 贡献率 CRpost/%
BS	叶 Leaf	0.167	51.36	0.570	33.05	1.634	34.88	1.064	65.12
	茎 Stem	0.360	35.00						
	穗轴+颖壳 Hull+Rachis	0.043	6.81						
PF	叶 Leaf	0.148	50.59	0.572	33.40	1.609	35.55	1.037	64.45
	茎 Stem	0.359	34.25						
	穗轴+颖壳 Hull+Rachis	0.065	10.46						
CK	叶 Leaf	0.146	48.90	0.622	37.07	1.554	40.02	0.932	59.98
	茎 Stem	0.387	33.98						
	穗轴+颖壳 Hull+Rachis	0.089	13.07						

注:BS:秸秆带状覆盖栽培;PF:地膜覆盖栽培;CK:无覆盖露地栽培;TA:各器官转运量;TR:各器官转运率;TApre:花前干物质转运量;TRpre:花前干物质转运率;CRpre:花前干物质转运量对籽粒产量贡献率;TApost:花后干物质输入籽粒量;CRpost:花后干物质积累量对籽粒产量贡献率。下同。

Note: BS: Bundled straw covering cultivation; PF: Plastic film mulching cultivation; CK: Cultivation without cover; TA: Translocation amount; TR: Translocation rate; TApre: Dry matter translocation amount of pre-anthesis; TRpre: Dry matter translocation rate of pre-anthesis; CRpre: Contribution rate of dry matter translocation amount pre-anthesis to grains; TApost: Dry matter accumulation amount of post-anthesis; CRpost: Contribution rate of dry matter accumulation amount post-anthesis to grains. The same below.

表 2 不同栽培模式下旱地冬小麦产量及其构成因素

Table 2 Grain yield and main agronomic indicators of the winter wheat under different covering models

处理 Treatment	穗数 Spike numbers /( $\times 10^4 \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数 Grain numbers per spike	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Yield /( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	经济系数 Harvest index
BS	353.9a	14.2a	37.87a	3556.5a	0.43b
PF	242.1b	16.1a	38.13a	3219.8ab	0.47a
CK	221.8b	15.1a	37.56a	2627.6b	0.46ab

注:不同小写字母表示处理间有显著差异( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at  $P = 0.05$  level.

不同栽培模式对旱地冬小麦旗叶光合同化的影响表明,覆盖可以提高旱地小麦旗叶  $P_n$ ,但这种作用两种覆盖处理出现了时间上的差异,PF 处理提高旗叶  $P_n$  主要在开花期和灌浆前期,而 BS 处理提高旗叶  $P_n$  贯穿在花后的整个生育过程中,较 CK 高出 6.2%~37.3%。推测其原因可能是在小麦生育后期的高温季节,PF 覆盖提高了土壤温度<sup>[29]</sup>,使小麦受到干旱和高温的双重胁迫,导致气孔导度和叶绿素含量下降、电子传递受阻,严重影响光能利用效率,从而影响净光合速率<sup>[30]</sup>,因此 PF 在灌浆中期以后  $P_n$  下降明显。开花期旱地小麦旗叶光合指标和叶绿素荧光指标明显低于其它各个时期,推测可能是由于开花期处于营养生长停止和生殖生长开始的时期,在这个特殊的过渡期,源库关系发生变化,旧的库源关系作废,新的库源关系尚未稳定形成,致使光合同化产物在营养器官中累积而不能及时转运出去,从而抑制旗叶光合同化的进行。对旱地

冬小麦旗叶荧光参数的研究显示,PF 在灌浆中期以前,BS 在整个花后生育期提高了旱地小麦花后旗叶  $F_v/F_m$ 、 $F'_v/F'_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$ 、 $ETR$ ,减小了  $NPQ$ ,说明覆盖提高了  $PSII$  光化学活性,减小了热耗散,提高光能利用效率,使之产生更多同化力-ATP、NADPH 用于碳固定,从而提高净光合速率,为覆盖增产提供了能量保障。这可能与 Rubisco 活性有关<sup>[31]</sup>,是旗叶光合色素含量增加的结果,这与光合参数研究的结果基本一致。

不同栽培模式对光合特性和叶绿素荧光参数的影响,在花后同化物输入籽粒量的差异中也得到证实。旱地冬小麦开花前后对籽粒产量的贡献率(输入籽粒量)表现为花前<花后,这与籽粒产量的大部分来源于开花后的光合生产<sup>[32-33]</sup>的研究结果相同,且不同栽培模式下花后同化物输入籽粒量及其籽粒贡献率表现为 BS>PF>CK,其中 BS 处理这 2 个指标较 PF 和 CK 处理分别高出 2.6%、1.0%和

14.2%、8.6%,说明覆盖栽培提高了籽粒中来自花后营养器官贮藏干物质的比例,因此,覆盖栽培均可增加粒重,且BS优于PF,这又与本试验中不同栽培模式对旱地冬小麦产量研究相呼应,即不同覆盖栽培模式下产量表现为BS>PF>CK,BS处理较CK增产35.4%,增产幅度大于PF。这可能是由于与无覆盖露地栽培相比,BS增加了光合潜力、光合色素含量,提高了光合特性,减缓了旗叶衰老进程,从而更显著地延长了冬小麦生育期,旗叶持绿时间长有利于花后干物质的积累和运转。同时,花后同化物积累再转运可能还与参与同化物代谢的酶<sup>[34-36]</sup>(果聚糖外水解酶、蔗糖合成酶、转化酶等)活性有关,尚需测定植株中糖代谢来进一步证实。

### 参考文献:

- [1] Fang Q X, Ma L, Green T R, et al. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: Current status and agronomic management options [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1102-1116.
- [2] Shi W J, Tao F L, Liu J Y. Changes in quantity and quality of cropland and the implications for grain production in the Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. *Food Security*, 2013, 5(1): 69-82.
- [3] 邱权,潘昕,李吉跃,等.青藏高原20种灌木抗旱形态和生理特征[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(6): 562-575.
- [4] 汪军成,孟亚雄,徐先良,等.大麦苗期抗旱性鉴定及评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(4): 135-143.
- [5] 马富举,李丹丹,蔡剑,等.干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 724-730.
- [6] Schansker G, Tóth S Z, Strasser R J. Methylviologen and dibromothymoquinone treatments of pea leaves reveal the role of photosystem I in the Chl a fluorescence rise OJIP [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2005, 1706(3): 250-261.
- [7] Ercoli L, Lulli L, Mariotti M, et al. Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability [J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(2): 138-147.
- [8] 杨荣,田长彦,买文选.新疆膜下滴灌棉花早衰的根系生长发育特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1384-1392.
- [9] 宋朝玉,宫明波,高倩,等.长期玉米秸秆还田模式下氮肥用量对玉米生长发育及土壤养分的影响[J]. *山东农业科学*, 2017, 49(10): 55-59.
- [10] 于稀水,廖允成,袁泉,等.秸秆覆盖条件下冬小麦棵间蒸发规律研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3): 58-61.
- [11] Wicks G, Crutchfield D A, Burnside O C. Influence of wheat (*Triticum aestivum*) straw mulch and metolachlor on corn (*Zea mays*) growth and yield [J]. *Weed Science*, 1994, 42(1): 141-147.
- [12] 柴守玺.一种旱地秸秆带状覆盖作物种植新技术[J]. *甘肃农业大学学报*, 2014, 49(5): 42.
- [13] 程宏波,柴守玺,陈玉章,等.西北旱地春小麦不同覆盖措施的温度和产量效应[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6316-6325.
- [14] 崔爱花,杜传莉,黄国勤,等.秸秆覆盖量对红壤旱地棉花生长及土壤温度的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 733-740.
- [15] 宋亚丽,杨长刚,李博文,等.秸秆带状覆盖对旱地冬小麦产量及土壤水分的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(6): 765-772.
- [16] 范颖丹,柴守玺,程宏波,等.覆盖方式对旱地冬小麦土壤水分的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3137-3144.
- [17] 黎克难.农作物的边际优势与利用[J]. *农业技术经济*, 1989, (2): 58-60.
- [18] 王芳,程宏波,李瑞,等.秸秆带状覆盖对旱地冬小麦土壤温度及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(6): 777-785.
- [19] 龚月桦,高俊凤,杜伟莉. K型杂交小麦901及其亲本原叶灌浆期的生理特性[J]. *作物学报*, 2003, (1): 138-144.
- [20] 张宪政.作物生理研究法[M].北京:农业出版社,1992.
- [21] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2006:81-84.
- [22] 郭志华,张旭东,黄玲玲,等.落叶阔叶树种蒙古栎(*Quercus mongolica*)对林缘不同光环境光能和水的利用[J]. *生态学报*, 2006, 26(4): 1047-1056.
- [23] And G H K, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the Basics [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1991, 42(42): 313-349.
- [24] 姜东,谢祝捷,曹卫星,等.花后干旱和渍水对冬小麦光合特性和物质运转的影响[J]. *作物学报*, 2004, 30(2): 175-182.
- [25] 冯晓钰,周广胜.夏玉米叶片水分变化与光合作用和土壤水分的关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 177-185.
- [26] 杨长刚,柴守玺,常磊,等.不同覆膜方式对旱作冬小麦耗水特性及籽粒产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 661-671.
- [27] 葛丽丽,高红兵,张启昌,等.东北红豆杉雌株枝、叶生长过程中内源激素变化的实验研究[J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2006, 7(2): 172-177.
- [28] 骆永丽,杨东清,尹燕萍,等.外源6-BA和不同用量氮肥配合对小麦花后叶片功能与荧光特性的调控效应[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(6): 1060-1083.
- [29] 兰雪梅,黄彩霞,李博文,等.不同覆盖材料对西北旱地冬小麦地温及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(8): 1084-1092.
- [30] Hassan I A. Effects of water stress and high temperature on gas exchange and chlorophyll fluorescence in *Triticum aestivum* L. [J]. *Photosynthetica*, 2006, 44(2): 312-315.
- [31] 黄纯倩,朱晓义,张亮,等.干旱和高温对油菜叶片光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2017, 39(3): 342-350.
- [32] 马尚宇,于振文,石玉,等.不同灌溉畦长对小麦光合特性、干物质积累及水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 997-1005.
- [33] 李向东,季书勤,张德奇,等.豫南雨养区周年不同耕作模式对小麦花后干物质动态和产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 1942-1948.
- [34] 汪顺义,刘庆,史衍玺,等.氮钾配施对甘薯光合产物积累及分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(14): 2706-2716.
- [35] 任娇,于寒,吴春胜,等.不同秸秆还田方式下玉米叶片光合、荧光特性及水分利用率的比较[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(12): 5241-5247.
- [36] Ould-Ahmed M, Decau M L, Morvan-Bertrand A, et al. Fructan, sucrose and related enzyme activities are preserved in timothy (*Phleum pratense* L.) during wilting [J]. *Grass & Forage Science*, 2017, 72(1): 64-79.