

## 秸秆覆盖方式对旱地冬小麦光合特征及产量的影响

李秀芳<sup>1</sup>, 李博文<sup>2</sup>, 阎龙霞<sup>1</sup>, 武永霞<sup>1</sup>, 苟振宇<sup>1</sup>, 柴雨葳<sup>1</sup>, 程宏波<sup>3</sup>, 黄彩霞<sup>4</sup>, 常磊<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学农学院/甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃省农业技术推广总站, 甘肃兰州 730070;

3. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃兰州 730070; 4. 甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃兰州 730070)

**摘要:**为探究不同秸秆覆盖方式下旱地冬小麦光合性能、产量的变化规律,以及实现旱地小麦科学秸秆覆盖,于2022—2023年在西北旱区以露地无覆盖为对照(CK),设置了秸秆带状覆盖播种4行(SSM4)、秸秆带状覆盖播种5行(SSM5)、碎秆全覆盖(SCM)3种覆盖方式,分析了不同秸秆覆盖方式下冬小麦土壤水分、干物质积累、旗叶光合特性、叶绿素含量和籽粒产量及其构成因素的差异。结果表明,秸秆覆盖下麦田土壤含水量较CK提高0.1~1.9个百分点,其中SSM4和SCM的增幅均在灌浆期最大,SSM5增幅在成熟期最大。与CK相比,秸秆覆盖下小麦花后0~28 d旗叶的平均净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )和蒸腾速率( $T_r$ )分别提高12.8%~18.7%、24.2%~38.0%和21.2%~33.8%,胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )降低7.9%~10.3%;SSM4和SSM5的 $P_n$ 和 $T_r$ 均以花后21 d增幅最大,SCM则分别以花后28和14 d增幅最大,SSM4、SSM5和SCM的 $G_s$ 增幅和 $C_i$ 降低均在花后28 d达到最大;叶绿素含量(SPAD值)显著提高,增幅3.9%~7.0%,其中SSM4和SSM5的最大增幅均出现在花后0 d,SCM的最大增幅则在花后21 d。秸秆覆盖的干物质积累量较CK提高0.7%~30.5%,其中SSM4、SSM5和SCM增幅分别在灌浆期、拔节期和孕穗期达到最大。秸秆覆盖显著增加了冬小麦的籽粒产量,SSM4、SSM5和SCM增幅分别为7.9%、18.6%和9.9%,其增产原因主要是穗数和千粒重的提高。由此可见,秸秆覆盖能有效增加旱地冬小麦土壤水分,促进干物质积累量,提高旗叶光合能力,最终通过增加穗数和千粒重提高小麦产量,且以秸秆带状覆盖播种5行效果最好。

**关键词:** 秸秆覆盖方式;冬小麦;光合特性;产量

中图分类号:S512.1+1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)09-1216-10

## Effects of Straw Mulching Methods on the Photosynthesis Characteristics and Yield of Winter Wheat in Drylands

LI Xiufang<sup>1</sup>, LI Bowen<sup>2</sup>, YAN Longxia<sup>1</sup>, WU Yongxia<sup>1</sup>, GOU Zhenyu<sup>1</sup>,

CHAI Yuwei<sup>1</sup>, CHENG Hongbo<sup>3</sup>, HUANG Caixia<sup>4</sup>, CHANG Lei<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China / Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Habitat Crop Science; 2. Gansu Provincial Agricultural Technology Extension Station, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Life Science and Technology College of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

4. Water Conservancy and Hydropower Engineering College of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** In order to explore the characteristics in photosynthetic performance and yield of dryland winter wheat under different straw mulching methods, three mulching methods were set up in the northwest arid region from 2022 to 2023: four rows of straw strip mulching sowing(SSM4), five rows of straw strip mulching sowing(SSM5), and full crushed-straw mulching(SCM), with bare ground as the control(CK). The differences of soil moisture, dry matter accumulation, flag leaf photosynthetic characteristics, chlorophyll content, grain yield and its components of winter wheat under different

收稿日期:2024-09-03 修回日期:2024-11-17

基金项目:国家小麦产业技术体系项目(CARS-03-85);甘肃省技术创新引导计划项目(22CX8NA046);国家重点研发计划项目(2022YFD2001304)

第一作者 E-mail:3036745296@qq.com(李秀芳)

通讯作者 E-mail:chang3258@126.com(常磊)

straw mulching methods were analyzed. The results showed that the soil moisture content in wheat fields under straw mulching increased by 0.1—1.9 percentage points compared to CK, with SSM4 and SCM showing the largest increase during the grain filling stage, and SSM5 showing the largest increase during the maturity stage. Compared with CK, straw mulching increased the average net photosynthetic rate( $P_n$ ), stomatal conductance( $G_s$ ), and transpiration rate( $T_r$ ) of wheat flag leaves from 0 to 28 days after flowering by 12.8% to 18.7%, 24.2% to 38.0%, and 21.2% to 33.8%, respectively. It also reduced the average intercellular  $CO_2$  concentration( $C_i$ ) by 7.9% to 10.3%. The net photosynthetic rate( $P_n$ ) and transpiration rate( $T_r$ ) of both SSM4 and SSM5 showed the greatest increase at 21 days after flowering, while SCM showed the greatest increase at 28 and 14 days after flowering, respectively. The stomatal conductance( $G_s$  increase) and intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$  decrease) of SSM4, SSM5, and SCM reached their maximum variation at 28 days after flowering. The chlorophyll content(SPAD value) significantly increased, with an increase rate of 3.9% to 7.0%. Among them, the maximum increase in SSM4 and SSM5 occurred at 0 day after flowering, while the maximum increase in SCM occurred at 21 days after flowering. The average dry matter accumulation during the entire growth period under straw mulching increased by 0.7% to 30.5% compared to CK. Among them, SSM4, SSM5, and SCM showed the largest increase during the grain filling stage; SSM5 showed the largest increase during the jointing stage, and SCM showed the largest increase during the booting stage. Straw mulching significantly increased the grain yield of winter wheat, with an increase rate of 7.9%, 18.6%, and 9.9% for SSM4, SSM5, and SCM, respectively. The main reason for the increase in yield was the increase in the number of spikes per unit area and thousand-grain weight. Thus, it can be seen that straw mulching can effectively increase soil moisture in dryland winter wheat, promote dry matter accumulation, improve flag leaf photosynthetic capacity, and facilitate yield formation. Ultimately, wheat yield can be improved by increasing the number of spikes and thousand-grain weight, and the best effect was achieved by sowing in 5 rows with straw strip mulching.

**Keywords:** Straw mulching methods; Winter wheat; Photosynthetic characteristics; Yield

小麦是中国西北旱区主要的粮食作物之一,该区域小麦种植面积约占中国小麦总面积的20%,但产量仅占9.9%<sup>[1-2]</sup>。降水是旱地小麦生产的主要水分来源。然而,中国西北干旱地区降水少且分布不均,小麦需水期与自然降水期的错位导致生产中干旱胁迫普遍发生。干旱胁迫致使小麦光能转化率下降,加速叶片衰老,影响灌浆进程,造成产量低而不稳<sup>[3-4]</sup>。农田秸秆覆盖可以蓄水保墒,缓解作物干旱胁迫,增加干物质积累量,促进粮食产能的提升<sup>[5]</sup>。中国的农作物秸秆资源丰富,其中玉米秸秆量占秸秆总资源的40.1%<sup>[6]</sup>。因此,在小麦种植过程中采用秸秆覆盖既可以充分利用秸秆资源,又能发挥增墒、提温等生态效应,对旱地小麦增产增收具有十分重要的意义。

光合产物积累是小麦产量形成的主要物质来源<sup>[7]</sup>。叶片是小麦光合作用的主要器官,产量的提升与叶片光合性能的强弱、叶绿素含量的高低

以及适宜的叶温有关<sup>[8]</sup>。覆盖方式会影响作物的光合性能<sup>[9]</sup>。秸秆覆盖可以调节土壤环境,延长作物在生育中后期的光合作用时间<sup>[10]</sup>,有利于改善光合性能,从而对作物生长和产量形成产生影响<sup>[11-12]</sup>。秸秆覆盖可增加冬小麦的净光合速率和气孔导度<sup>[13]</sup>。在西北中部旱作雨养农业区,秸秆带状覆盖可以提高小麦旗叶的光合速率和叶绿素含量,增强小麦花后旗叶的光合功能,促进同化物的转运,实现增产<sup>[14]</sup>。不同的秸秆覆盖方式下,小麦叶片叶绿素含量存在显著差异<sup>[15-17]</sup>。研究发现,秸秆粉碎全覆盖可以增加小麦叶片叶绿素含量,缓解干旱胁迫对光合作用造成的影响,增大光能截获率,促进小麦光合作用和营养物质积累<sup>[18-19]</sup>。秸秆带状覆盖可以提高马铃薯叶绿素含量,且提高幅度与产量呈显著正相关<sup>[10]</sup>。提高叶绿素含量可以有效促进小麦增产<sup>[20]</sup>。王文杰等<sup>[21]</sup>研究表明,秸秆覆盖可以显著促进春小麦的

干物质积累,从而显著增加产量。Wang等<sup>[22]</sup>对中国西北黄土高原近十年的研究结果显示,秸秆覆盖可以在干旱年份提高旱地小麦籽粒产量。Huang等<sup>[23]</sup>的研究也证实秸秆覆盖对小麦产量的提高作用。同时,种植密度也会影响小麦的产量。适宜的种植密度不仅可以促进小麦主茎和分蘖穗结实,延缓植株衰老,而且能调控小麦群体结构和光能利用效率,提高小麦植株各器官的光能同化量,增加穗粒数和籽粒产量<sup>[24-25]</sup>。秸秆覆盖方式和适宜的种植密度结合可以促进小麦的生长发育,增加光合能力,显著提升冬小麦的生物产量与籽粒产量<sup>[20,26]</sup>。

综上所述,秸秆覆盖可以改善作物的光合作用,增加作物产量。然而目前有关秸秆带状覆盖对不同种植密度下旱地冬小麦光合性能及产量的影响还不明晰。本研究通过田间试验,探究不同秸秆覆盖方式下冬小麦土壤水分、干物质积累、光合性能及叶绿素含量的变化,明确秸秆覆盖对旱

地冬小麦籽粒产量及其构成要素的影响,探讨出最适宜西北旱区地区的秸秆覆盖技术,以期为旱地冬小麦高产高效栽培技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

2022年9月—2023年7月,在甘肃省通渭县旱作循环农业试验基地(35°11'N,105°19'E,海拔1750 m)进行大田试验。该地区属于半干旱半湿润的季风性气候,为典型的旱地雨养农业区,作物一年一熟,多年平均降水量为390.6 mm(主要集中于7—9月份),年蒸发量1500 mm,年均气温7.2℃,无霜期120~170 d。试验地土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量分别为11.7 g·kg<sup>-1</sup>、0.6 g·kg<sup>-1</sup>、10.6 mg·kg<sup>-1</sup>和107.1 mg·kg<sup>-1</sup>,pH值为8.5。2022—2023年冬小麦生育期内平均气温为12.4℃,总降水量为247.9 mm,有效降水量(≥5 mm)为187.8 mm(图1)。

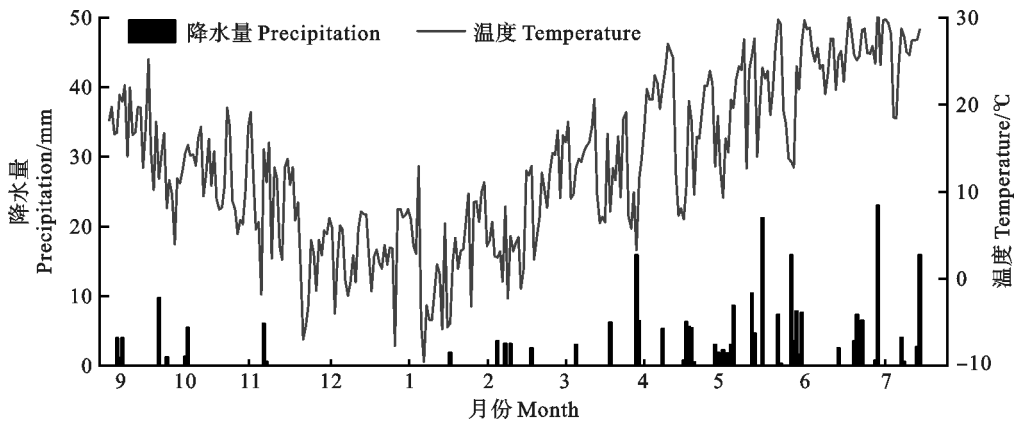


图1 冬小麦生育期内降水和大气温度变化

Fig. 1 Change of precipitation and atmospheric temperature during the whole growth period of winter wheat

### 1.2 试验设计

小麦于2022年9月22日播种,2023年7月8日收获。供试冬小麦品种为兰大211。试验采用随机区组设计,设秸秆带状覆盖播种4行(SSM4)、秸秆带状覆盖播种5行(SSM5)和碎秆全覆盖(SCM),以露地无覆盖为对照(CK),共4个处理,3次重复。(1)SSM4:小麦种植带宽70 cm,机械条播4行,行距23 cm;人工铺设秸秆覆盖带,带宽50 cm,秸秆覆盖量约9000 kg·hm<sup>-2</sup>,两带交替布置。(2)SSM5:小麦种植带宽70 cm,机械条播5行,行距17 cm;人工铺设秸秆覆盖带,带宽50 cm,秸秆覆盖量约9000 kg·hm<sup>-2</sup>,两带交替布置。(3)SCM:小麦机械条播,

行距17 cm,将玉米秸秆粉碎至3~5 cm左右,于冬小麦三叶期覆盖,以不见露地为宜,秸秆覆盖量约9000 kg·hm<sup>-2</sup>。(4)CK:小麦机械条播,行距17 cm,不进行覆盖处理。小区面积为180 m<sup>2</sup>,小麦播量均为225 kg·hm<sup>-2</sup>,播前底施纯N 120 kg·hm<sup>-2</sup>和P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup>,生育期内不追肥。其他管理同当地常规管理一致。

### 1.3 测定指标与方法

#### 1.3.1 土壤含水量的测定

在冬小麦播种—成熟期,分8个时期用土钻在小麦种植行间取0~200 cm土层土样,分8个土层(0~20、20~40、40~60、60~90、90~120、120~150、150~180和180~200 cm),用烘干法

(105±0.5 °C)测定土壤含水量。土壤含水量=(土壤鲜重-土壤干重)/(土壤干重-铝盒重)×100%<sup>[20]</sup>。

### 1.3.2 干物质测定

于冬小麦越冬期、返青期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期、成熟期在各小区随机取 20 株长势均匀的小麦植株,按器官称鲜重后,于 105 °C 烘箱杀青 30 min,在 80 °C 下烘干至恒重,称干重,并换算成群体干物质质量<sup>[7]</sup>。

### 1.3.3 叶片光合指标及相关参数测定

于冬小麦开花期、花后 7 d、14 d、21 d 和 28 d,取样选在晴天上午 9:00—11:30,各小区选取 3 片受光方向一致的旗叶,利用 Li-6400 便携式光合仪,测定旗叶的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )<sup>[20]</sup>,取平均值,并计算瞬时水分利用效率(IWUE)即  $P_n$  与  $T_r$  的比值<sup>[27]</sup>。在测定光合参数的同时,各小区选取受光方向一致的 5 片旗叶用 SPAD-502 手持式叶绿素检测仪测定旗叶 SPAD 值和叶温,取平均值。

### 1.3.4 产量和其构成因素测定

冬小麦成熟后按小区收获,现场称鲜重且取样测籽粒含水量,晒干后称干重测定实产,并随机选取 1 000 粒完整的籽粒测算千粒重。在冬小麦

收获前各小区采用 5 点取样法取样并混合,每个点取 10 株,从混合样中随机取长势均匀的 20 株单株进行考种,测定株高、穗长、穗粒数、植株干物重等。在成熟期各小区挑选 5 个 1 m<sup>2</sup> 样区测定穗数。

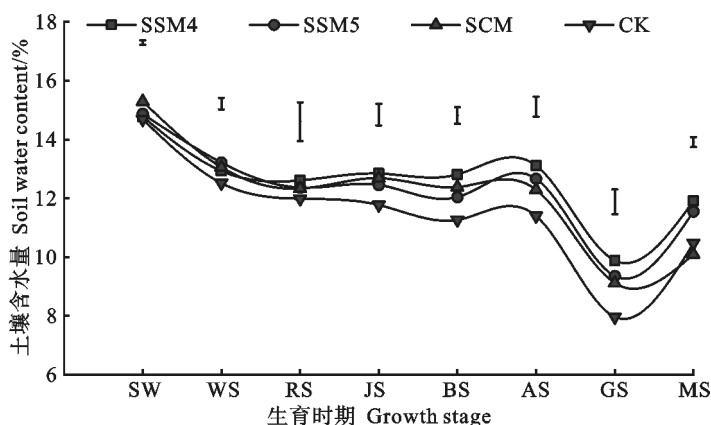
## 1.4 统计分析

数据采用 Excel 2016 和 Origin 2021 进行整理、作图,使用 SPSS25.0 进行相关性分析和方差分析,通过 LSD 和 Duncan 法进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆覆盖对冬小麦不同生育时期 0~200 cm 土壤平均含水量的影响

在冬小麦播种期—成熟期,秸秆覆盖条件下田间土壤含水量较 CK 提高 0.1~1.9 个百分点,SSM4 和 SCM 的土壤含水量增幅均在灌浆期最大,分别为 1.9 和 1.2 个百分点,而 SSM5 的增幅在成熟期最大,为 1.5 个百分点(图 2)。3 种秸秆覆盖方式相比,SSM4 的土壤含水量平均增幅最大(1.2 个百分点),SSM5 次之(0.9 个百分点),SCM 较小(0.7 个百分点)。这说明 3 种秸秆覆盖均具有增墒效应,且秸秆带状覆盖播种 4 行的效果最佳。



SW、WS、RS、JS、BS、AS、GS 和 MS 分别指播种期、越冬期、返青期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期和成熟期。图 7 同。

SW, WS, RS, JS, BS, AS, GS, and MS refer to the growth stages of sowing, over-wintering, re-greening, jointing, booting, grain-filling and maturity, respectively. The same in figure 7.

图 2 不同秸秆覆盖方式下冬小麦不同生育时期土壤含水量

Fig. 2 Soil water content at different growth stages of winter wheat under different straw mulching methods

## 2.2 秸秆覆盖对冬小麦旗叶光合特性的影响

### 2.2.1 净光合速率( $P_n$ )

各处理下小麦旗叶  $P_n$  在花后 0~28 d 均呈先增后降趋势变化,在花后 14 d 达最大值(图

3A)。与 CK 相比,秸秆覆盖显著提高花后 14~28 d 的  $P_n$  值,增幅 20.6%~32.1%,其中 SSM4 和 SSM5 均以花后 21 d 增幅最大,分别为 29.5% 和 32.1%,而 SCM 在花后 28 d 增幅最大,为 24.6%。

三种秸秆覆盖方式之间,在花后 0~28 d 的平均增幅以 SSM5 最高,SSM4 次之,SCM 最低,但总体上三种秸秆覆盖方式间差异较小。可见,秸秆覆盖可以提高旱地冬小麦花后旗叶的净光合速率,且以秸秆带状覆盖播种 5 行的效果最佳。

2.2.2 气孔导度

各处理下小麦旗叶  $G_s$  在花后 0~28 d 的变化趋势与  $P_n$  一致(图 3B)。秸秆覆盖的  $G_s$  在花后 0~28 d 均高于 CK,除花后 7 d 外差异均显著,增幅为 21.1%~96.5%;SSM4、SSM5 和 SCM 均以花后 28 d 增幅最大,分别为 82.5%、96.5%和 58.2%。总体来看,秸秆覆盖的  $G_s$  在花后 0~28 d 的平均增幅以 SSM5 最大,SCM 最小,SSM4 和 SSM5 间差异不显著。可见,秸秆覆盖能够提高冬小麦花后旗叶的气孔导度。

2.2.3 胞间  $CO_2$  浓度

秸秆覆盖后旱地冬小麦花后 0~28 d 的旗叶  $C_i$  值较 CK 显著降低,降幅 4.2%~15.4%,以花后 28 d 降幅最大,SSM4、SSM5 和 SCM 降幅分别为 12.9%、13.5%和 15.4%(图 3C)。3 种秸秆覆盖方式间,SSM5 的降幅最大,SSM4 次之,SCM 较小。由此说明,影响冬小麦花后旗叶光合

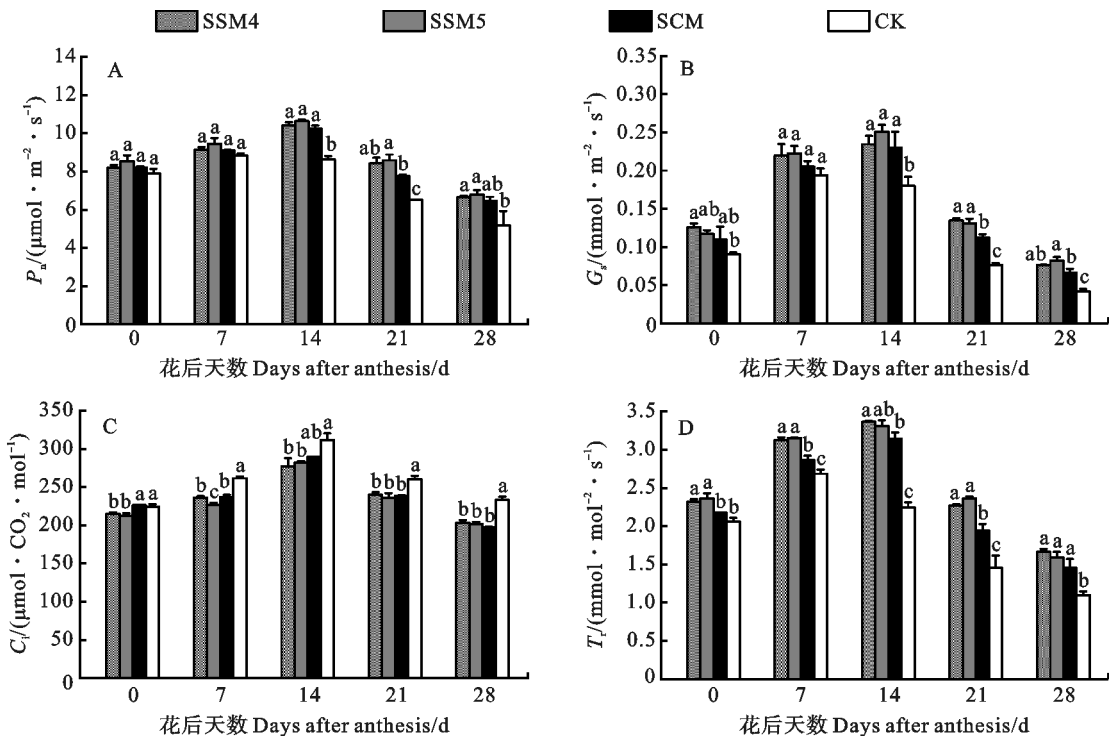
作用的因素为非气孔因素。

2.2.4 蒸腾速率( $T_r$ )

各处理下小麦旗叶  $T_r$  随着花后生育天数的增加呈现先升后降的变化规律,在花后 14 d 出现峰值(图 3D)。在花后 0~28 d,秸秆覆盖的  $T_r$  较 CK 提高 12.5%~62.6%,差异均显著,其中 SSM4 和 SSM5 以花后 21 d 增幅最大,分别为 56.1%和 62.6%,SCM 以花后 14 d 增幅最大,为 39.8%。由此可见,秸秆覆盖可显著促进旱地冬小麦花后水分蒸腾,以 SSM4 和 SSM5 效果最佳,二者差异不显著。

2.2.5 瞬时水分利用效率

各处理下小麦花后旗叶的 IWUE 呈现先降后平缓上升趋势(图 4)。与 CK 相比,秸秆覆盖条件下花后 7 d 和 14 d 的 IWUE 显著下降,降幅分别为 9.0%~11.3%和 15.3%~19.6%;SSM4、SSM5 和 SCM 降幅均以花后 14 d 最大,分别为 19.6%、16.5%和 15.3%。三种秸秆覆盖方式间,SSM4 和 SSM5 的 IWUE 较 CK 的平均降幅较大,分别为 14.7%和 12.3%,但三种秸秆覆盖方式间差异较小。由此可见,秸秆覆盖对蒸腾速率的影响大于净光合速率。



图中小写字母表示相同花后天数内各处理之间显著差异( $P < 0.05$ )。下图同。

Different letters above the columns indicate significant differences among treatments at the same stages after anthesis at 0.05 level. The same in figures 4-7.

图 3 不同秸秆覆盖方式下冬小麦花后旗叶的光合参数

Fig. 3 Photosynthetic parameters in flag leaf of of winter wheat after anthesis under different straw mulching methods

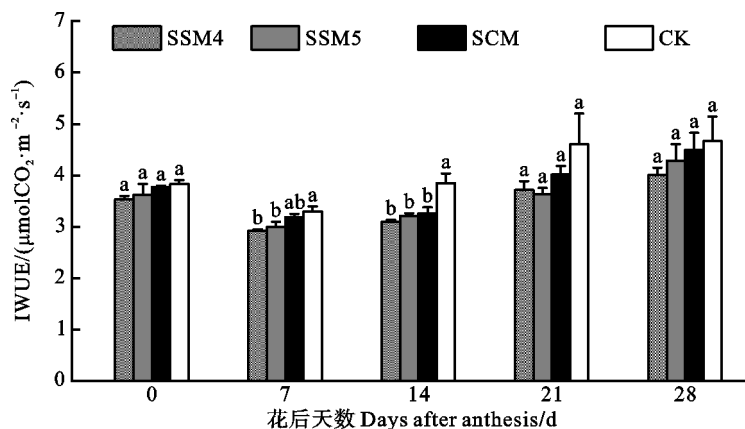


图 4 不同秸秆覆盖方式下冬小麦花后旗叶的瞬时水分利用效率

Fig. 4 Instantaneous water use efficiency in flag leaves of winter wheat after anthesis under different straw mulching methods

### 2.3 秸秆覆盖对冬小麦叶片叶绿素含量的影响

各处理下小麦旗叶叶绿素含量(SPAD 值)在花后 0~28 d 呈现先升后降的变化趋势(图 5)。秸秆覆盖的 SPAD 值在花后 0~28 d 比 CK 增加 5.3%~10.0%，其中 SSM4 和 SSM5 在花后 0 d 增幅最大(分别为 8.2% 和 10.0%)，SCM 在花后 21 d 增幅最大(5.8%)。在花后 0~28 d，3 种秸秆覆盖方式中 SSM5 的 SPAD 值最高与 CK 差异均显著，SCM 最低，但 3 种秸秆覆盖方式间差异均不显著。可见，秸秆覆盖可使冬小麦花后旗叶叶绿素含量保持在较高水平，有助于光合生产。

### 2.4 秸秆覆盖对旱地小麦旗叶温度的影响

各处理下小麦旗叶温度在花后 0~28 d 呈现先升后降的变化趋势(图 6)。与 CK 相比，秸秆覆盖下冬小麦花后 0~28 d 旗叶温度降低了 1.9%~2.3%，但不同处理间差异均不显著。

### 2.5 秸秆覆盖对冬小麦地上部干物质积累的影响

在小麦生育期中干物质积累量呈不断上升趋势，且表现为在越冬期—返青期增长缓慢，拔节期

后增速加快，灌浆期后变化平缓(图 7)。与 CK 相比，在越冬期—返青期，SSM5 的干物质积累量增加 16.2%~30.9%，而 SSM4 和 SCM 降低 0.3%~11.4%；拔节期—成熟期，秸秆覆盖下干物质积累量增加 2.5%~41.2%，SSM4、SSM5 和 SCM 的增幅分别在灌浆期、拔节期和孕穗期达到 4.4%、41.2% 和 14.8%。3 种秸秆覆盖方式间，SSM5 的干物质积累量平均增幅最大(30.5%)，SCM 次之(5.8%)，SSM4 较小(0.7%)。可见，秸秆覆盖可促进冬小麦地上部干物质积累，尤其是加快返青期之后的干物质积累。

### 2.6 秸秆覆盖对冬小麦产量及产量构成要素的影响

秸秆覆盖对小麦增产作用明显(表 1)。与 CK 相比，SSM4、SSM5 和 SCM 的产量均显著提高，增幅分别为 7.94%、18.59% 和 9.93%。从产量构成看，SSM4 和 SSM5 增产原因为单位面积穗数和千粒重的提高，而 SCM 处理增产原因则是穗粒数与千粒重的提高。

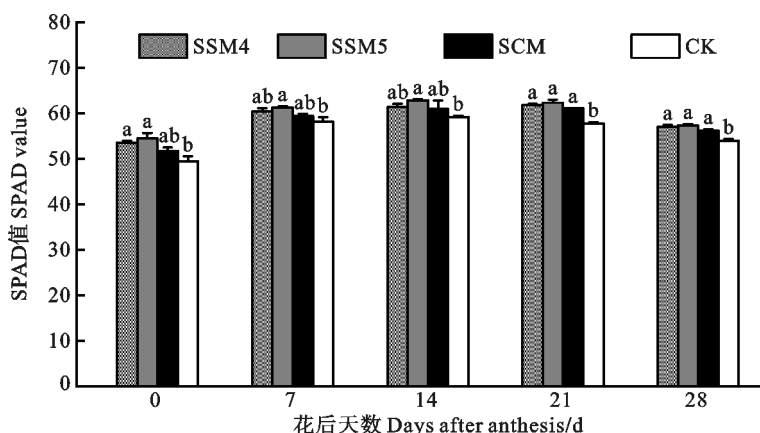


图 5 不同覆盖处理下旱地冬小麦花后旗叶 SPAD 的变化

Fig. 5 SPAD value in flag leaves of dryland winter wheat after anthesis under different straw mulching methods

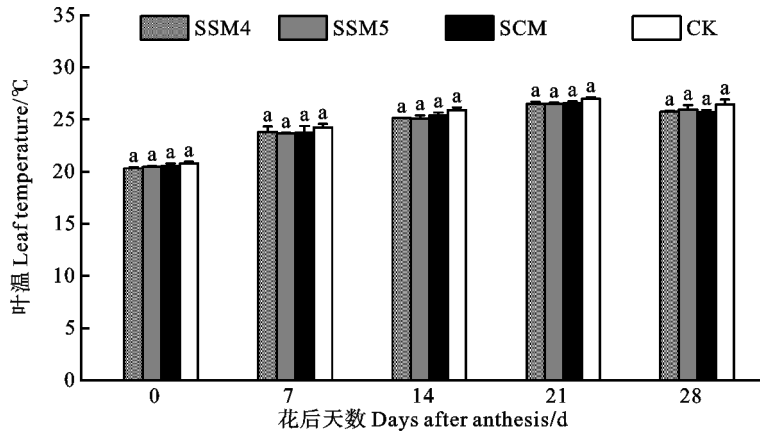


图 6 不同秸秆覆盖方式下旱地冬小麦花后旗叶温度

Fig. 6 Flag leaf temperature of dryland winter wheat after anthesis under different straw mulching methods

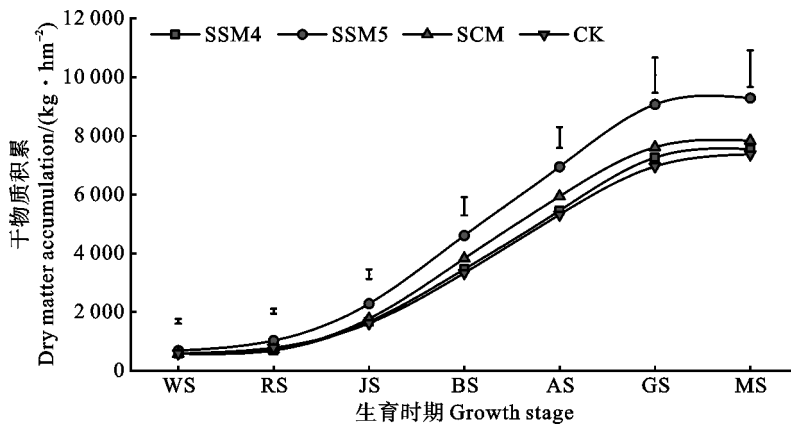


图 7 不同秸秆覆盖方式下冬小麦不同生育时期干物质积累量

Fig. 7 Dry matter accumulation of winter wheat at different growth stages under different straw mulching methods

表 1 不同秸秆覆盖方式下冬小麦产量及构成要素

Table 1 Winter wheat yield and components under different straw mulching methods

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield/(kg · hm <sup>-2</sup> )	收获指数 Harvest index/%	穗数 Spikes/(×10 <sup>4</sup> · hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain yield/g
SSM4	2 555.4b	33.1a	263.3b	33.2ab	41.7a
SSM5	2 806.8a	33.9a	291.2a	32.0c	42.2a
SCM	2 602.6b	33.0a	236.3c	38.3a	41.3a
CK	2 367.5c	32.5a	240.9c	35.6ab	37.0b

同列数值后不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

Different letters after the values within the same columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level.

### 3 讨论

#### 3.1 覆盖方式对冬小麦土壤水分、光合参数特征的影响

土壤水热是确保作物生长发育和光合作用的关键因素<sup>[28-29]</sup>。本试验中,秸秆覆盖增强了冬小麦各生育时期土壤的蓄水保墒能力,有利于小麦个体的生长发育和群体结构的建成和质量提高,

从而增加光合作用器官的光能截获量,为小麦干物质快速积累及高产奠定基础<sup>[30]</sup>。秸秆覆盖可以降低土壤表面蒸发量,改善土壤墒情与温度,提升作物的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,减缓花后旗叶的叶绿素降解速度,显著改善冬小麦花后光合效率,增强籽粒的灌浆能力,达到增产效果<sup>[31-33]</sup>。本研究发现,不同秸秆覆盖方式下旱地冬小麦旗叶净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均

表现为 SSM5 > SSM4 > SCM > CK, 3 种方式的秸秆覆盖均较 CK 显著提高了冬小麦旗叶的光合特性,其中以 SSM5 效果最好,说明秸秆覆盖可以提高冬小麦花后旗叶的光合能力,这与之前有关秸秆覆盖对冬小麦光合特性影响的研究结果一致<sup>[13,34]</sup>。究其原因:第一,秸秆覆盖提高了小麦旗叶的比叶重,增加了叶肉导度和 CO<sub>2</sub> 的同化效率<sup>[35]</sup>,从而表现为净光合速率有所提高并显著高于露地种植;第二,覆盖增加了土壤有机碳含量和微生物量碳氮,提高了纤维素酶、蔗糖酶和脲酶的活性,改善土壤结构和植株营养状况,进而提高了小麦的光合速率<sup>[19]</sup>;第三,秸秆覆盖充分保证了作物对水分的需求,植株不需要为降低蒸腾而减少叶面积<sup>[21,35]</sup>,满足作物对光能的捕获而提高光合特性。本研究中,秸秆覆盖处理均较 CK 显著提高了冬小麦花后旗叶的叶绿素含量。叶片叶绿素的增加一方面有助于光合速率的提高<sup>[36]</sup>,另一方面可以延缓叶片衰老,延长其光合作用持续时间,从而提高光能利用率<sup>[37]</sup>。同时,胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的变化趋势与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和叶绿素含量的变化趋势相反,这与前人<sup>[10]</sup>研究结果相同,说明气孔因素未对小麦的生长造成限制。秸秆覆盖可以提升叶绿素含量,降低非气孔限制,增强了小麦的光合性能,提高小麦净光合速率,这一点与前人<sup>[38]</sup>在免耕秸秆还田对玉米光合性能和产量的研究结论相符。

### 3.2 秸秆覆盖对冬小麦干物质积累、产量的影响

在西北旱区,农田覆盖栽培能蓄水保墒,调节土壤温度,从而影响作物的光合能力,增加干物质积累量,最终提高作物产量<sup>[21,39]</sup>。研究发现,秸秆覆盖在调节土壤水分含量的同时,改善根系特性,促进小麦对水分和养分的吸收利用,并降低叶绿素的降解速度,延缓生育后期叶片的衰老,促进干物质的积累,提升小麦产量<sup>[40]</sup>。陈影慧等<sup>[41]</sup>发现,秸秆覆盖能够显著提高旱地冬小麦花后旗叶的光合速率,促进干物质积累,提升产量。本研究也得出相似结果,3 种覆盖方式均较 CK 增加了冬小麦的干物质积累量和产量,其中均以秸秆带状覆盖播种 5 行增幅最大。同时,该覆盖处理对小麦增产的原因主要在于单位面积穗数的提高,这与前人研究结果类似<sup>[21]</sup>。原因可能是秸秆覆盖缓解了冬小麦生育期的水分胁迫,提高了其水分利用效率,增加了光合潜力,改善冬小麦花后旗叶光合性能,更显著地延长了冬小麦生育期,从

而增加花后干物质积累能力,最终提高冬小麦籽粒产量<sup>[42]</sup>。

## 4 结论

秸秆覆盖下,土壤 0~200 cm 的含水量高于露地无覆盖,表明秸秆覆盖有良好的蓄水增墒作用。秸秆覆盖还提高了旱地冬小麦花后旗叶的叶绿素含量、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,减少非气孔因素对光合作用的限制,增强对胞间 CO<sub>2</sub> 的利用效率,增加干物质积累量,促进冬小麦产量的形成。各处理中以秸秆带状 5 行对冬小麦光合性能、叶绿素含量、干物质积累量和籽粒产量的提升效应最好。

### 参考文献:

- [1] 杨慧敏,王涛,窦瑛霞,等.不同降水年型地膜覆盖及秸秆覆盖提高小麦产量和氮素利用的效应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(11):1905.  
YANG H M, WANG T, DOU Y X, *et al.* Effects of plastic film mulching and straw mulching on wheat yield and nitrogen utilization during different precipitation years [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(11):1905.
- [2] 赵广才,常旭虹,王德梅,等.中国小麦生产发展潜力研究报告[J].作物杂志,2012(3):1.  
ZHAO G C, CHANG X H, WANG D M, *et al.* Research report on development of China's wheat production potential [J]. *Crops*, 2012(3):1.
- [3] 和娟,唐燕,李晓瑞,等.水分亏缺对小麦芒和旗叶光合特性及蔗糖、淀粉合成的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(6):53.  
HE J, TANG Y, LI X R, *et al.* Effects of water deficit on photosynthetic characteristic and sucrose-starch synthesis of wheat awns and flag leaf [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(6):53.
- [4] 张振旺,吴金芝,黄明,等.干旱胁迫对不同抗旱性冬小麦灌浆期下午旗叶光合特性和籽粒产量的影响[J].2022,37(2):67.  
ZHANG Z W, WU J Z, HUANG M, *et al.* Effects of drought stress on the photosynthetic characteristics in flag leaf in the afternoon during the grain filling stage and grain yield of winter wheat with different drought resistance [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(2):67.
- [5] 侯慧芝,吕军峰,郭天文,等.旱地全膜覆土穴播对春小麦耗水、产量和土壤水分平衡的影响[J].中国农业科学,2014,47(22):4392.  
HOU H Z, LÜ J F, GUO T W, *et al.* Effects of whole field soil-plastic mulching on spring wheat water consumption, yield, and soil water balance in semiarid region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(22):4392.
- [6] 霍丽丽,赵立欣,孟海波,等.中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J].农业工程学报,2019,35(13):218.  
HUO L L, ZHAO L X, MENG H B, *et al.* Study on straw

- multi-use potential in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(13): 218.
- [7] 王健波, 严昌荣, 刘恩科, 等. 长期免耕覆盖对旱地冬小麦旗叶光合特性及干物质积累与转运的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 296.
- WANG J B, YAN C R, LIU E K, *et al.* Effects of long-term no-tillage with straw mulch on photosynthetic characteristics of flag leaves and dry matter accumulation and translocation of winter wheat in dryland [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 296.
- [8] 张俊豪, 柴雪茹, 马嵩科, 等. 秸秆还田配施磷肥对豫西旱地小麦碳同化物积累的影响及其生理机制[J]. *草业学报*, 2024, 33(6): 89.
- ZHANG J H, CHAI X R, MA S K, *et al.* Effects of straw return combined with phosphorus fertilizer on carbon assimilate accumulation in dryland wheat and the associated physiological mechanisms [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(6): 89.
- [9] XIE W, HE P, MA H L, *et al.* Straw mulching combined with phosphorus fertilizer increases fertile florets of wheat by enhancing leaf photosynthesis and assimilate utilization [J]. *Agronomy*, 2023, 13(9): 2342.
- [10] 冯雨露, 张森昱, 杨成存, 等. 秸秆带状覆盖对半干旱雨养区马铃薯光合特性及产量的影响[J]. *核农学报*, 2023, 37(7): 1442.
- FENG Y L, ZHANG S Y, YANG C C, *et al.* Effects of straw strip mulching on potato photosynthetic characteristics and yield in semi-arid rainfed areas [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(7): 1442.
- [11] 刘继龙, 陈俊丰, 曹晓强, 等. 黑土区玉米生理生长特性及产量对不同秸秆覆盖与施肥量的响应[J]. *排灌机械工程学报*, 2024, 42(6): 627.
- LIU J L, CHENG J F, CAO X Q, *et al.* Physiological growth characteristics and yield of maize in black soil areas in response to different straw mulches and fertilizer application rates [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2024, 42(6): 627.
- [12] 郭志鹏, 李盼, 胡发龙, 等. 绿洲灌区玉米光能利用与水分生产效益对地膜秸秆带状覆盖的响应[J]. *玉米科学*, 2024, 32(9): 59.
- GUO Z P, LI P, HU F L, *et al.* Response of light use efficiency and water production efficiency of maize in oasis irrigation areas to strip mulching with plastic film and straw [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, 32(9): 59.
- [13] YANG Y H, DING J L, ZHANG Y H, *et al.* Effects of tillage and mulching measures on soil moisture and temperature, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 299.
- [14] 侯慧芝, 张绪成, 尹嘉德, 等. 覆盖对西北旱地春小麦旗叶光合特性和水分利用的调控[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 931.
- HOU H Z, ZHANG X C, YIN J D, *et al.* Regulation of mulch conditions on photosynthesis and water utilization of spring wheat in northwest semi-arid area of China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 931.
- [15] ZHANG W, CHEN X X, LIU Y M, *et al.* The role of phosphorus supply in maximizing the leaf area, photosynthetic rate, coordinated to grain yield of summer maize [J]. *Field Crops Research*, 2018, 219: 113.
- [16] ZHAI Y L, WU Q Z, CHEN G D, *et al.* Broadcasting winter wheat can increase grain yield without reducing the kernels per spike and the kernel weight [J]. *Sustainability*, 2018, 10(12): 4858.
- [17] 田家明, 张智猛, 戴良香, 等. 外源钙对盐碱土与非盐碱土花生生长发育与光合特性的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(6): 130.
- TIAN J M, ZHANG Z M, DAI L X, *et al.* Effects of exogenous calcium on the development and photosynthetic characteristics of peanut in saline-alkali soil and normal soil [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(6): 130.
- [18] 张蓉, 董禄信, 孙长红, 等. 秸秆粉碎覆盖沟播对旱地冬小麦产量及土壤水热特征的影响[J]. *节水灌溉*, 2021(7): 60.
- ZHANG R, DONG L X, SUN C H, *et al.* Effects of straw crushing & mulching and furrow sowing on winter wheat yield and soil hydrothermal characteristics in dryland [J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(7): 60.
- [19] YANG Y H, LIU H, WU J C, *et al.* Soil enzyme activities, soil physical properties, photosynthetic physical characteristics and water use of winter wheat after long-term straw mulch and organic fertilizer application [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1186376.
- [20] 阎龙霞, 马建涛, 柴雨葳, 等. 不同覆盖方式对旱地冬小麦土壤水热及光合特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(9): 1185.
- YAN L X, MA J T, CHAI Y W, *et al.* Effect of different mulching methods on hydrothermal and photosynthetic characteristics of winter wheat in drylands [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(9): 1185.
- [21] 王文杰, 马建涛, 柴雨葳, 等. 不同覆盖方式对旱地春小麦土壤水热及生长的影响[J]. *麦类作物学报*, 2023, 43(9): 1206.
- WANG W J, MA J T, CHAI Y W, *et al.* Effects of different mulching methods on soil moisture, temperature, and growth of dryland spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(9): 1206.
- [22] WANG J, GHIMIRE R, FU X, *et al.* Straw mulching increases precipitation storage rather than water use efficiency and dryland winter wheat yield [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 206: 95.
- [23] HUANG C, WU Y, YE Y, *et al.* Straw strip mulching increases winter wheat yield by optimizing water consumption characteristics in a semi-arid environment [J]. *Water*, 2022, 14(12): 1894.
- [24] 马金荣, 张鸿雁, 王雅群, 等. 种植密度对不同穗型冬小麦品种结实特性和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2023, 43(12): 1607.
- MA J R, ZHANG H Y, WANG Y Q, *et al.* Effects of planting density on grain setting characteristics and grain yield of winter wheat cultivars with two spike types [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(12): 1607.
- [25] 郭丹丹, 刘哲文, 常旭虹, 等. 强筋小麦群体结构、光能利用及籽粒产量对种植密度与追氮模式的响应[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(1): 82.

- GUO D D, LIU Z W, CHANG X H, *et al.* Response of population structure, light utilization and grain yield to planting density and nitrogen topdressing in strong gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(1): 82.
- [26] 高甜甜, 柴守玺, 李亚伟, 等. 秸秆带状覆盖对西北旱地小麦籽粒灌浆速率和产量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(1): 183.
- GAO T T, CHAI S X, LI Y W, *et al.* Effects of straw strip mulching on grain-filling rate and yield of wheat in northwest dryland [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(1): 183.
- [27] 杨文雄, 柳娜, 刘效华, 等. 半干旱区膜上覆土穴播对春小麦旗叶光合作用和水分利用的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2264.
- YANG W X, LIU N, LIU X H, *et al.* Photosynthetic gas exchange and water utilization of flag leaf of spring wheat with bunch sowing and field plastic mulching below soil on semi-arid rain-fed area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2264.
- [28] 冯茜, 金丽惠, 薛海清, 等. 增温和土壤肥力对大豆光合特征和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(35): 111.
- FENG Q, JIN L H, XUE H Q, *et al.* Effects of elevated temperature and soil fertility on photosynthetic characteristics and yield of soybean [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(35): 111.
- [29] XIA H, RIAZ M, LIU B, *et al.* Peanut shell biochar in acidic soil increases nitrogen absorption and photosynthesis characteristics of maize under different nitrogen levels [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 25(9): 8957.
- [30] 阚茗溪, 王艳杰, 于慧玲, 等. 灌水对节水小麦“衡观35”产量、蛋白质含量及光合性能的影响[J]. 作物杂志, 2023(1): 68.
- KAN M X, WANG Y J, YU H L, *et al.* Effects of irrigation on yield, protein content and photosynthetic performance of water-saving wheat “Hengguan 35” [J]. *Crops*, 2023(1): 68.
- [31] ZHANG Y Q, WANG J D, GONG S H, *et al.* Straw mulching improves soil water content, increases flag leaf photosynthetic parameters and maintains the yield of winter wheat with different irrigation amounts [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 249: 106809.
- [32] YIN W, CHAI Q, GUO Y, *et al.* The physiological and ecological traits of strip management with straw and plastic film to increase grain yield of intercropping wheat and maize in arid conditions [J]. *Field Crops Research*, 2021, 271: 108242.
- [33] 谢炜, 贺鹏, 马宏亮, 等. 秋闲期秸秆覆盖与施磷对冬小麦氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(2): 440.
- XIE W, HE P, MA H L, *et al.* Effects of straw mulching from autumn fallow and phosphorus application on nitrogen uptake and utilization of winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(2): 440.
- [34] 高仁才, 陈松鹤, 马宏亮, 等. 秋闲期秸秆覆盖与氮肥减施对旱地冬小麦干物质积累、结实特性和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(3): 426.
- GAO R C, CHEN S H, MA H L, *et al.* Effects of straw mulching in autumn and reducing nitrogen application on dry matter accumulation, seed-setting characteristics and yield of dryland winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(3): 426.
- [35] 贺鹏, 谢炜, 马宏亮, 等. 秸秆覆盖与施磷对西南冬小麦叶肉导度和CO<sub>2</sub>同化效率的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(23): 9674.
- HE P, XIE W, MA H L, *et al.* Effects of straw mulching and phosphorus fertilization on mesophyll conductance and CO<sub>2</sub> assimilation efficiency of winter wheat in southwest hilly regions of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23): 9674.
- [36] ÖZDEMİR E, SADE B. Line × tester analysis of stomatal conductance, chlorophyll content, photosynthetic efficiency, and transpiration rate traits in maize [J]. *Maydica*, 2019, 64(1): 2279.
- [37] WANG Z, SUN J, DU Y D, *et al.* Conservation tillage improves the yield of summer maize by regulating soil water, photosynthesis and inferior kernel grain filling on the semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(6): 2330.
- [38] LIU J L, LIU L, FU Q, *et al.* Effects of straw mulching and tillage measures on the photosynthetic characteristics of maize leaves [J]. *Transactions of the ASABE*, 2019, 62(3): 851.
- [39] CUI Y K, TIAN Z W, ZHANG X, *et al.* Effect of water deficit during vegetative growth periods on post-anthesis photosynthetic capacity and grain yield in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37(10): 196.
- [40] 王靖, 林琪, 倪永君, 等. 旱地保护性耕作对冬小麦光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 480.
- WANG J, LIN Q, NI Y J, *et al.* Effect of conservation tillage on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat in dry land [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(3): 480.
- [41] 陈影慧, 程宏波, 刘媛, 等. 覆盖栽培模式对冬小麦花后旗叶光合特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 192.
- CHEN Y H, CHENG H B, LIU Y, *et al.* Effect of covering on photosynthetic characteristics of flag leaf during post-anthesis and yield in winter wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3): 192.
- [42] 石珊珊, 周苏玫, 尹钧, 等. 高产水平下水肥耦合对小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(3): 549.
- SHI S S, ZHOU S M, YIN J, *et al.* Effects of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristics in flag leaves and yield of winter wheat under high yield condition [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(3): 549.