

不同量秸秆覆盖对春玉米光合生理的影响

蔡太义^{1,2}, 张合兵¹, 黄会娟³, 黄耀威⁴, 刘昌华¹, 贾志宽^{2*}, 杨宝平², 黄艳丽¹

(1.河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 2.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3.河南理工大学体育学院, 河南 焦作 454000; 4.河南省农业厅, 郑州 450008)

摘 要:为了探明不同量秸秆覆盖对春玉米全生育期光合特性的影响机理,2007—2009 年在陕西合阳县西北农林科技大学旱农试验站,以传统耕作作为对照(CK),设置玉米秸秆覆盖量分别为 4500(S1)、9000(S2)、13 500 kg·hm⁻²(S3)的定位试验。结果表明,各覆盖量处理春玉米叶片群体净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)在 2008 和 2009 年均表现出协同变化趋势,随覆盖量的递增, P_n 、 T_r 、 G_s 、叶片水分利用效率(WUE 瞬时)、PS II 潜在活性(F_v/F_o)、PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)和光化学淬灭系数(qP)呈依次升高趋势,其中,S1 和 CK 处理的 P_n 在 2008—2009 年均呈“单峰型”曲线变化特征,峰值出现在拔节期;S2 和 S3 处理则表现为“双峰型”曲线变化特征,峰值分别出现在拔节期和孕穗期,且前者高于后者。S1、S2 和 S3 处理 2008 年籽粒产量较 CK 分别显著增产 7.65%、16.19% 和 17.84% ($P<0.05$)。2009 年各处理籽粒产量增长趋势和 2008 年一致,但增幅整体低于 2008 年,统计分析表明,S3 处理光合特性及籽粒产量整体优于 S2,但两者间无显著差异($P>0.05$)。以上结果表明,不同量秸秆覆盖措施均能通过改善春玉米不同生育时期光合特性,达到增产目的,但从有利于生产实际及提高经济效益来看,渭北旱塬乃至其他同类生态区(春玉米生育期降水量低于 390 mm)进行玉米整株秸秆覆盖时推荐选择 9000 kg·hm⁻² 的覆盖量。

关键词: 秸秆覆盖量; 光合生理; 春玉米; 产量; 渭北旱塬

中图分类号: S181 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2012)11-2128-08

Effects of Cropping Systems Using Straw Mulching on Photosynthetic Physiology of Spring Maize(*Zea mays* L.) During Different Rates

CAI Tai-yi^{1,2}, ZHANG He-bing¹, HUANG Hui-juan³, Huang Yao-wei⁴, LIU Chang-hua¹, JIA Zhi-kuan^{2*}, YANG Bao-ping², HUANG Yan-li¹
(1.School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2.Chinese Institute of Water-saving Agriculture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3.School of Physical Education, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 4. The Agriculture Department of Henan Province, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: A field experiment (2007—2009) was conducted at the Dry Farming Base of Northwest A & F University, Heyang County, Shaanxi Province, China. We evaluated the effects of various treatments at different straw mulching rates on photosynthetic physiologies of spring maize (*Zea mays* L.). Four treatments were tested: conventional tillage (CK) and maize straw mulching at rates of 4500 kg·hm⁻² (S1), 9000 kg·hm⁻² (S2) and 13 500 kg·hm⁻² (S3). The results showed that there was a coordinated variation trend of net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s) in 2008—2009. The P_n , T_r , G_s , leaf water use efficiency ($WUE_{instantaneous}$), PS II potential activity (F_v/F_o), PSII maximal photochemical yield (F_v/F_m) and photochemical quenching coefficient (qP) of S1, S2 and S3 were higher than that of the CK, and it increased with the rates of straw mulching. The P_n of S1 and CK showed a “single peak” curve in 2008—2009, the peak appeared during the jointing stage; However, which of S2 and S3 showed a “double peak” curve, with the peak during the jointing and booting stage, respectively, and the former was higher than the latter. Grain yields of S1, S2 and S3 were increased by 7.65%, 16.19% and 17.84%, respectively, compared with CK in 2008, Similar variations were seen for grain yields in 2009, however, the increasing rate of grain yields in 2009 was less than in 2008. The variance analysis showed that the photosynthetic capacity and grain yield of S3 were higher than the S2,

收稿日期: 2012-05-22

基金项目: 国家“十二”科技支撑计划项目(2011BAD29B09); 国土资源部公益项目(201211050-10); 河南理工大学博士基金(B2012-005)和博士后基金项目; 河南理工大学青年基金项目(Q2010-15a)

作者简介: 蔡太义(1972—), 男, 博士, 主要从事土壤水碳循环和土地生态研究。E-mail: caity2008@hpu.edu.cn

* 通信作者: 贾志宽 E-mail: Jiazhk@126.com

whereas there was no significant difference between S3 and S2 ($P>0.05$). It was concluded that the treatments of different straw mulching rates were beneficial for improving the photosynthetic characteristic of spring maize, and had higher grain yields than the CK. Our findings suggest that farmers should adopt rational technologies with straw mulching to obtain the optimal effects in terms of increased crop photosynthetic capacities and grain yields, taking into account the actual production and economic benefit. This technique would be appropriate for straw mulching at rates of $9000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in Weibei Highland area, China, and the above results might make for other dryland farming regions throughout the world, where the precipitation is below than 390 mm during the spring maize growth period.

Keywords: straw mulching rate; photosynthetic physiology; spring maize; yield; Weibei Highland area

干旱是旱区春玉米生产的主要非生物限制因子^[1],对作物的生理影响机理主要在于:使植株的生理代谢受损^[2]、叶片气孔阻力增加、叶绿素含量减少^[3]、净光合速率减弱^[4-5],光系统 II (PS II) 的光化学活性被抑制,作物的最大荧光产量(F_m)和最大光化学效率(F_v/F_m)降低^[6],导致春玉米减产,特殊年份部分地区甚至绝收^[7]。

国内外相关研究表明,秸秆覆盖能改善农田近地面的水热状况^[8],增加土壤含水量^[9-12],强化土壤有机质积累^[13],提高作物水分利用效率^[14-15]。不少学者就秸秆覆盖对作物光合生理机制的影响进行了有益探讨,但大多采用盆栽方法,且仅选取作物个别生育时期进行研究^[5,16-18],尤以分析叶片光合作用的日变化居多^[19-20]。Singh 等^[21]研究表明,秸秆覆盖能够提高作物光合生产能力,但 Ferrini 等^[22]指出,覆盖措施对植物叶绿素荧光基本无影响。鉴此,研究大田环境条件下秸秆覆盖尤其不同量秸秆覆盖对作物不同生育期光合生理的影响,具有一定的新颖性。本文通过设置不同水平的秸秆覆盖,对春玉米光合生理响应进行综合比较,同时分析产量效应,旨在探明渭北旱塬不同量秸秆覆盖对春玉米全生育期光合特性的影响机理,为丰富和完善秸秆覆盖栽培理论提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在陕西省合阳县甘井镇西北农林科技大

学旱农基地($34^{\circ}15'N, 106^{\circ}30'E$,海拔 900 m),是黄土高原中南部典型的半湿润易旱区。多年年均降水量为 538.2 mm,年际间变异系数(8.8%)较大,且季节性分布不均,主要集中在 6—9 月(表 1)。年蒸发量 1 832.8 mm,干燥度为 1.5。当地塬面平坦开阔,光热资源充足,年平均温度为 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 169~180 d。供试土壤为中壤质壤土。2007 年基础土壤,0~100 cm 土层,田间持水率、饱和含水率、土壤平均容重和孔隙度分别为 22.11%、31.27%、 $1.33\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 49.3%。0~20 cm 耕层土壤理化性质:全有机质、全氮、全磷和全钾质量分数分别为 11.36、0.84、0.53、 $7.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;硝态氮、氨态氮、速效磷和速效钾质量分数分别为 24.61、1.95、11.57、 $113.79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;pH 值为 8.1。

1.2 试验设计

试验于 2007 年秋季开始,连续 2 个生产年度(2007—2009 年)进行定位试验,设置 3 个水平秸秆覆盖:4500、9000、 $13\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别以 S1、S2 和 S3 表示,以不覆盖为对照(CK),共 4 个处理。小区面积 24 m^2 ,随机区组排列,3 次重复。覆盖方式为整秸秆全程(休闲期和生育期)覆盖。冬闲期覆盖是在前茬玉米收获后,先将上茬覆盖未腐解的秸秆铡碎翻耕还田,然后按照试验设计再进行整秆均匀覆盖,同一小区位置及秸秆覆盖量不变。

覆盖处理播前先将用于覆盖的秸秆搂到地边,然后进行人工翻耕、整地、施肥,不同处理小区统一施肥水平:施尿素(总氮 $\geq 46.4\%$) $532.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷酸二铵

表 1 合阳试验站 1976—2009 年逐月降水量(mm)

Table 1 The distribution of monthly precipitation in 1976—2009 in Heyang experiment station(mm)

年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年降水量	生育期降水量
2007	0.0	26.0	46.1	5.6	19.9	71.9	196.1	83.2	55.9	48.3	1.6	9.5	564.1	466.6
2008	29.1	8.3	13.0	31.7	23.5	95.7	54.4	123.5	65.2	15.0	0.0	0.0	459.4	315.0
2009	1.2	23.5	19.8	12.8	136.5	46.8	46.6	96.8	52.4	24.8	37.4	2.4	501.0	390.0
1976—2006	5.6	9.3	19.6	31.2	44.1	57.4	111.9	114.7	77.3	46.7	15.3	5.2	538.2	380.0
CV/%	151.9	55.4	59.6	64.8	97.7	31.2	67.5	17.3	17.7	48.8	127.4	95.4	8.8	16.0

注:CV 为变异系数。CV meant coefficient of variation.

(总养分 $\geq 60.0\%$) $326.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, KCl ($\text{K}_2\text{O}\geq 60.0\%$) $326.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。为防治地下害虫,在整地前撒施呋喃丹 $27.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

供试品种为豫玉 22 号,南北行种植,人工穴播,行株距 $67.5\text{ cm}\times 30\text{ cm}$,种植密度为 $49\ 500\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,每年 4 月 23—25 日播种;播种后将每一小区搂到地边的秸秆重新均匀覆盖到原来小区。所有处理生育期不追肥,无补充灌溉。每年 9 月 17—20 日进行人工收获。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 光合参数测定

在玉米的各生育时期用美国产 LI-6400 光合仪分别测定功能叶片(大喇叭口期以前为第 1 片完全展开叶,之后为棒三叶)的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r);测定时间为晴朗天气的上午 9:00—11:00, WUE 瞬时用 P_n/T_r 计算。

1.3.2 叶绿素荧光参数测定

采用德国 Walz 公司生产的 Imaging-PAM 调制荧光仪,测定各生育时期玉米功能叶活体叶片的初始荧光(F_0)、最大荧光产量(F_m)、可变荧光(F_v)和光化学淬灭系数(qP),并计算出 PS II 最大光化学量子产量(F_v/F_m)。测定前暗适应 20 min。

1.3.3 产量测定

玉米成熟期,剔除边行植株,在每个小区中间两行人工收获。收获后的玉米秸秆和风干籽粒均在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干 48 h,称重计算玉米生物产量(籽粒产量与秸秆产量之和)及籽粒产量,籽粒产量水分控制在 12.0%以下。

1.4 数据处理

在 2007 年试验基础上,对 2008、2009 年两个不同降水年型的试验结果进行比较,叶绿素荧光参数采用 2009 年测定数据。运用 SAS 8.01 对试验数据进行单因素方差(ANOVA)分析、最小显著差数(LSD)法进行显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 春玉米光合生理参数变化特征

2.1.1 群体净光合速率(P_n)

图 1 显示,S1 和 CK 处理春玉米两年平均 P_n 呈“单峰型”曲线变化,峰值出现在拔节期;S2 和 S3 处理在两年均呈“双峰型”曲线变化,峰值分别出现在拔节期和孕穗期,且前者高于后者。与 CK 相比,S1、S2 和 S3 处理两年平均 P_n ,在拔节期分别提高-6.73%、

8.78%和 15.33%;在大喇叭口期分别显著($P<0.05$)降低 7.86%、17.79%和 12.24%;在孕穗期分别提高-0.06%、33.91%和 36.19%。这说明覆盖处理在拔节期抑制土壤蒸发作用最明显。两年的 P_n 均显著高于 CK (除 S1),且随覆盖量的增加而提高。大喇叭口期(播后 80 d 左右)是玉米营养生长和生殖生长并进时期,此时表现为各覆盖处理 P_n 均明显低于 CK,进入孕穗期后,覆盖处理促进作物蒸腾作用的优势最明显。成熟期,虽然各覆盖处理的绿叶数多于 CK,但由于此时渭北高原温度较低,各处理的 P_n 表现为基本无显著差异。此外,玉米苗期(播后 30 d 左右)各覆盖处理的 P_n 均低于 CK,可能是覆盖处理出苗较晚的缘故。

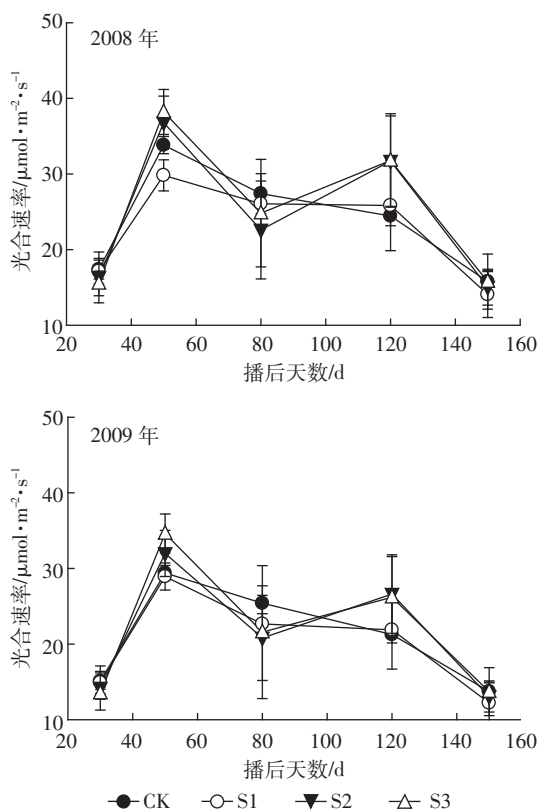


图 1 2008—2009 年不同处理对春玉米群体净光合率的影响
Figure 1 Effects of different treatments on net photosynthesis rate (P_n) of spring maize in 2008—2009

2.1.2 蒸腾速率(T_r)

不同处理的 T_r 与 P_n 变化趋势基本一致(图 2)。与 CK 相比,拔节期 S1 和 S2 处理两年平均 T_r 分别显著($P<0.05$)降低 11.61%和 9.61%,但 S3 却提高 7.67%;大喇叭口期 S1、S2 和 S3 处理分别降低 5.32%、23.71%和 19.62%;孕穗期 S1、S2 和 S3 处理分别显著($P<0.05$)增加 23.13%、79.19%和 78.27%。这进一步说明秸秆覆盖在作物生长后期主要是促进作物的蒸腾

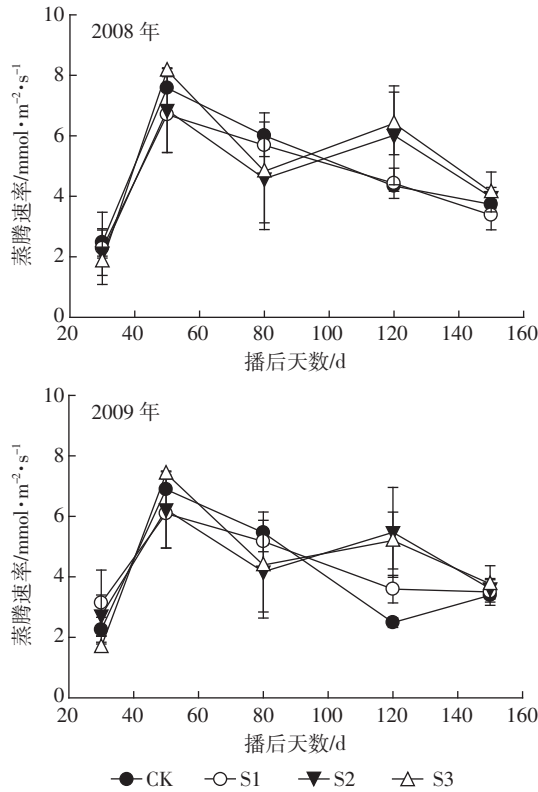


图2 2008—2009年不同处理对春玉米蒸腾速率的影响

Figure 2 Effects of different treatments on transpiration rate (T_r) of spring maize in 2008—2009

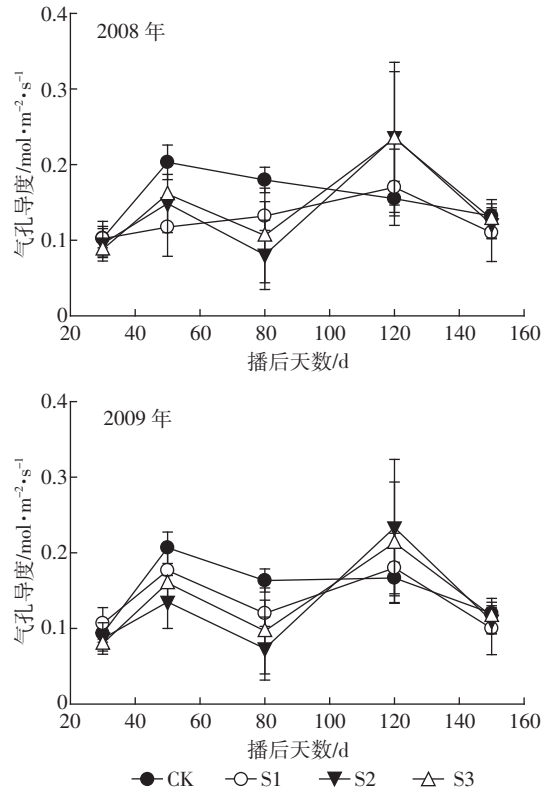


图3 2008—2009年不同处理对春玉米气孔导度的影响

Figure 3 Effects of different treatments to stomatal conductance (G_s) of spring maize in 2008—2009

作用,且表现为随覆盖量增加蒸腾作用逐渐增强。

2.1.3 气孔导度(G_s)

2008年,S1和CK处理的 G_s 呈“单峰型”曲线(图3),峰值分别出现在拔节期和孕穗期;而S2和S3则呈“双峰型”曲线,峰值均分别出现在拔节期和孕穗期,且前者低于后者;2009年各处理 G_s 变化与 P_n 变化趋势相同。与CK相比,S1、S2和S3处理2年平均 G_s 在拔节期分别显著($P<0.05$)降低27.14%、29.17%和21.91%;大喇叭口期分别显著($P<0.05$)降低38.19%、55.90%和26.39%;孕穗期分别显著($P<0.05$)增加6.07%、42.65%和33.64%。这说明不同覆盖量处理的气孔导度在不同降水年型、作物不同生育时期变化趋势比较复杂,主要与气孔导度受光照度、水分状况、空气相对湿度和气温等因素影响有关^[23]。

2.1.4 叶片瞬时水分利用效率($WUE_{\text{瞬时}}$)

图4显示,与CK相比,S1、S2和S3处理2年平均 $WUE_{\text{瞬时}}$,拔节期分别提高5.51%、7.15%和20.39%;大喇叭口期分别增加2.68%、7.82%和9.26%;但孕穗期分别降低16.82%、20.06%和20.08%。说明生长前期覆盖处理促进了春玉米 $WUE_{\text{瞬时}}$ 的增长,后期则使其

下降。原因在于生长后期覆盖处理比CK延长了春玉米绿叶持续天数,其 T_r 降低缓慢,但 $WUE_{\text{瞬时}}$ 是 P_n 和 T_r 的比值,因此覆盖处理的 $WUE_{\text{瞬时}}$ 低于CK。

2.1.5 叶绿素荧光参数

2009年,S1、S2及S3处理的 F_o 与CK相比,拔节期分别降低8.33%、8.33%和8.33%;孕穗期分别降低11.54%、7.69%和15.39%,但各覆盖量处理的 F_o 则无显著差异(表2),这表明CK的PSⅡ反应中心电子传递破坏程度在拔节期较孕穗期严重;各覆盖处理的光化学活性在拔节期及孕穗期较CK均显著降低,玉米生长条件得到改善,表2同时表明,S1、S2及S3处理的 F_m 及 F_v 在拔节期显著高于CK,孕穗期则与CK无显著差异。

为进一步比较不同处理对春玉米荧光参数的影响,对2009年不同处理对春玉米 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 qP 的影响作了对比分析(表3)。由表3可知,与CK相比,S1、S2及S3处理的 F_v/F_m 在拔节期显著提高,孕穗期则无显著差异;其 F_v/F_o 及 qP 在拔节期及孕穗期均显著提高。这表明CK的最大PSⅡ光能转化效率、潜在活性和原初反应过程受到抑制的强烈程度远高于各

表 2 2009 年不同处理对春玉米荧光参数的影响
Table 2 Effects of different treatment on F_o , F_m and F_v of spring maize in 2009

处理	拔节期			孕穗期		
	F_o	F_m	F_v	F_o	F_m	F_v
CK	0.24±0.01a	0.99±0.12b	0.75±0.12b	0.26±0.01a	1.03±0.05a	0.76±0.05a
S1	0.22±0.01b	1.16±0.03ab	0.91±0.07a	0.23±0.02b	1.08±0.09a	0.85±0.11a
S2	0.22±0.01b	1.13±0.08a	0.94±0.04a	0.24±0.01ab	1.09±0.11a	0.85±0.13a
S3	0.22±0.01b	1.19±0.05a	0.97±0.04a	0.22±0.01b	1.09±0.05a	0.86±0.08a

注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。Different small letters meant significant difference within the treatments at 0.05 level by LSD. The same below.

表 3 2009 年不同处理对春玉米 F_v/F_m , F_v/F_o 和 qP 的影响
Table 3 Effects of different treatment on F_v/F_m , F_v/F_o and qP of spring maize in 2009

处理	拔节期			孕穗期		
	F_v/F_m	F_v/F_o	qP	F_v/F_m	F_v/F_o	qP
CK	0.76±0.03b	3.18±0.51b	0.67±0.04c	0.74±0.01a	2.91±0.20b	0.66±0.02c
S1	0.80±0.01a	4.14±0.30a	0.71±0.04b	0.79±0.03a	3.73±0.78a	0.72±0.03b
S2	0.81±0.01a	4.34±0.12a	0.76±0.06a	0.78±0.03a	3.51±0.61a	0.74±0.06a
S3	0.80±0.01a	3.97±0.03a	0.73±0.02ab	0.79±0.01a	3.86±0.23a	0.73±0.04ab

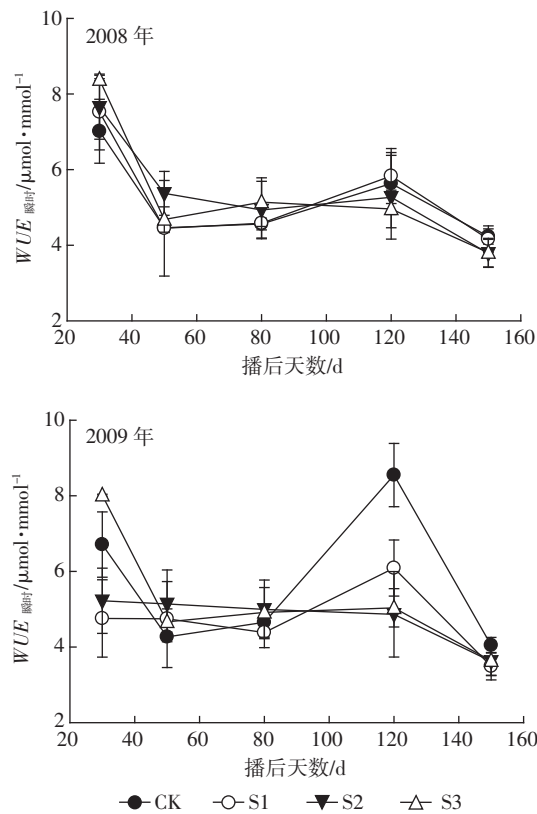


图 4 2008—2009 年不同处理对春玉米 $WUE_{瞬时}$ 的影响

Figure 4 Effects of different treatments to $WUE_{instantaneous}$ of spring maize in 2008—2009

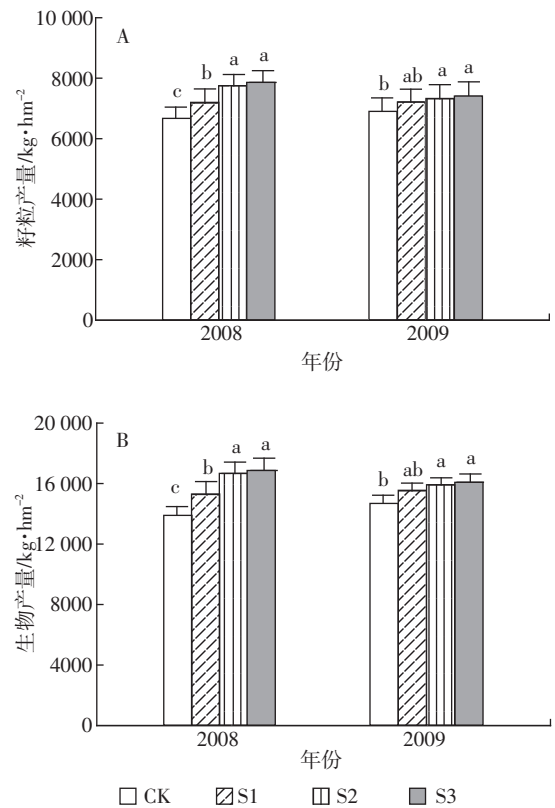


图 5 2008—2009 年不同处理春玉米籽粒产量(A)和生物产量(B)

Figure 5 Grain yield(A) and biomass yield(B) of spring maize under different treatments in 2008—2009

覆盖处理。其中,覆盖处理的 PS II 光能转化效率和潜在活性,整体表现为随覆盖量增加而提高,但 S3 与 S2 无显著差异($P>0.05$)。

2.2 产量

不同量秸秆覆盖对春玉米光合生理的影响,最终体现在籽粒产量及生物产量的增加方面。

图 5A 表明,2008 年,S1、S2 和 S3 处理籽粒产量较 CK 分别增产 7.65%、16.19% 和 17.84%,其中,S3 产量最高,较 S2 增产 1.42%,但 S3 和 S2 之间、S1 和 CK 之间均无显著差异 ($P>0.05$);2009 年籽粒产量,S1、S2 和 S3 较 CK 分别增产 4.51%、6.04% 和 7.17%,其中 S2 和 S3 均显著高于 CK,S1 和 CK 则无显著差异。可见,不同量覆盖处理 2008 年的增产效果明显优于 2009 年,说明不同降水年型(表 1),秸秆覆盖的增产效应存在明显差异。

图 5B 表明,2008 年和 2009 年,S2 和 S3 的生物产量较 CK 均显著增产($P<0.05$),但 S2 和 S3 之间则无显著差异 ($P>0.05$)。S1 的生物产量与 CK 相比,2008 年显著增产,而 2009 年则无显著差异。

3 讨论

3.1 秸秆覆盖量与春玉米光合特性

秸秆覆盖促进了植物叶片的蒸腾作用,因叶片光合-蒸腾存在良好的线性耦合,故促进了植株光合性能的增强^[18,21],本研究得出了相似结果。本试验同时表明,春玉米生育期群体净光合速率呈“双峰型”曲线变化,峰值分别出现在拔节期和孕穗期,且前者高于后者(图 1)。原因在于拔节期是玉米叶片快速生长期,而秸秆覆盖改善了玉米拔节期的水热条件,促进新生叶片旺盛生长,并且提高了单位叶面积叶绿素含量,致使植株叶片平均光合速率最高,即出现第一峰值。孕穗期玉米由营养生长转向生殖生长,籽粒对光合产物的需求量增大,叶片中同化产物转移迅速,促使光合速率加快,出现第二峰值,然而此时下位叶的部分叶片已老化,故表现为孕穗期的平均光合速率峰值整体低于拔节期。此外,本研究中 S1、S2 及 S3 处理的 F_v 在拔节期和孕穗期均显著低于 CK,而 F_v/F_m 、 F_i/F_o 和 qP 在拔节期均高于 CK,孕穗期与 CK 无显著差异,说明不同量秸秆覆盖对作物光合生理影响主要表现在作物生长前期,后期影响相对较弱,这从叶绿素荧光参数变化角度,进一步解释了拔节期光合速率峰值高于孕穗期的原因。这与盛晋华等^[24]在内蒙古的春玉米试验结论一致,但和李永平等^[25]在黄土高原风蚀区春玉米秸秆覆盖的研究结论不同,李永平等研究认为:春玉米生育期净光合速率呈“双峰型”曲线变化,峰值分别在拔节期和抽雄期,但前者低于后者。造成结论不一致的原因可能是李永平等采用的玉米品种为“正大 12 号”,而本试验采用“豫玉 22 号”所致。因为已有研究表明,不同玉米品

种、株型和密度,其群体光合速率存在较大差异^[26],而此方面的影响机理亟需在同一生态条件下作进一步的对比分析试验。

3.2 秸秆覆盖量与作物产量

不同量秸秆覆盖条件下作物的产量效应问题,截止目前仍无定论。王昕等^[27]在宁南山区的研究结果表明,春玉米秸秆覆盖量在 9000~13 500 kg·hm⁻² 时较不覆盖增产 16.9%;高亚军等^[28]研究表明,黄土高原半湿润易旱区覆盖小麦秸秆 6000 kg·hm⁻²,冬小麦未增产甚至减产。本试验表明,与 CK 相比,不同覆盖处理两年均表现为增产趋势,但 S1 增产不显著,这与高亚军等^[28]研究结论一致,究其原因可能是 S1 覆盖量过少,覆盖效应不明显所致;S2 和 S3 处理显著增产(图 5),这与王昕等^[27]研究结果类似,原因在于 S2 和 S3 处理覆盖量适中,能为作物生长提供有利的水、气、热组合^[29]。本研究同时表明,S2 和 S3 处理的增产效应在 2008 年明显优于 2009 年(图 5),这可能与春玉米关键生育期降水量多寡和分布不均有关(表 1):2009 年春玉米生育期降水量(390 mm)较 2008 年(315 mm)增加 75 mm,但 2009 年 6—8 月降水量(190.2 mm)较 2008 年(273.6 mm)减少 83.4 mm,由于 6—8 月是渭北旱塬春玉米拔节、孕穗和灌浆的关键时期,该时期有效降水能改善春玉米光合系统,提高光合速率和蒸腾速率,增强库器官同化和建成能力,优化春玉米产量性状,致使其经济产量得以提高^[30]。

从玉米光合特性变化来看(图 1~图 4),S3 和 S2 处理在玉米关键生育时期(拔节、大喇叭口和孕穗期)均无显著差异;但 S3 和 S2 处理的经济产量和生物产量均高于 S1 和 CK(图 5),然而,S3 和 S2 间则无显著差异($P>0.05$)。结合笔者前期研究成果来看^[31],S3 处理的经济效益虽然与 S2 无显著差异,但产投比却显著低于 S2。综上,渭北旱塬春玉米整株秸秆覆盖时,推荐 S2 处理(9000 kg·hm⁻²)作为适宜的覆盖量。需要说明的是,由于本研究仅是渭北旱塬 2 个不同降水年型的统计结果,结论的普适性有待进一步通过长期定位实验和增加覆盖量梯度来进一步验证。

4 结论

(1)不同量秸秆覆盖措施均能明显提高玉米光合特性。 P_n 、 T_r 和 G_s 在 2008 年和 2009 年均表现出协同变化趋势,随覆盖量递增, P_n 、 T_r 、 G_s 、 F_v/F_m 、 F_i/F_o 和 qP 整体表现出逐渐升高趋势,且 S1 和 CK 处理的 P_n 在 2008—2009 年均呈现“单峰型”变化特征,峰值在

拔节期,S2和S3处理则成“双峰型”变化特征,峰值分别出现在拔节期和孕穗期,且前者高于后者。

(2)不同量秸秆覆盖措施通过改善春玉米光合作用,达到了增产目的。综合考虑,渭北旱塬乃至其他同类生态区(春玉米生育期降水量低于390 mm)进行整株玉米秸秆覆盖时推荐选择9000 kg·hm⁻²的覆盖量。

参考文献:

- [1] Sharp R E, Poroyko V, Hejlek L G, et al. Root growth maintenance during water deficits: Physiology to functional genomics[J]. *J Exp Bot*, 2004, 55(407): 2343-2351.
- [2] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海: 上海科技出版社, 2002: 821-831.
XU Da-quan. Photosynthetic efficiency[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002: 821-831.
- [3] Hirasawa T, Hsiao T. Some characteristics of reduced leaf photosynthesis at midday in maize growing in the field[J]. *Field Crops Research*, 1999, 62(1): 53-62.
- [4] Gall A, Flexas J. Gas-exchange and chlorophyll fluorescence measurements in grapevine leaves in the field[J]. *Methodologies and Results in Grapevine Research*, 2010: 107-121.
- [5] 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 复水前后冬小麦光合生理特征对保水剂用量的响应[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 116-123.
YANG Yong-hui, WU Pu-te, WU Ji-cheng, et al. Response of photosynthetic parameters of winter wheat before and after re-watering to different rates of water-retaining agent [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(7): 116-123.
- [6] Genty B, Briantais J, Baker N. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence[J]. *Biochimica ET Biophysica Acta(BBA) - General Subjects*, 1989, 990(1): 87-92.
- [7] Campos H, Cooper M, Habben J, et al. Improving drought tolerance in maize: A view from industry[J]. *Field Crops Research*, 2004, 90(1): 19-34.
- [8] 方文松, 朱自玺, 刘荣花, 等. 秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 123-128.
FANG Wen-song, ZHU Zi-xi, LIU Rong-hua, et al. Study on microclimate characters and yield-increasing mechanism in straw mulching field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(6): 123-128.
- [9] Li R, Hou X Q, Jia Z K, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on soil water, temperature, and maize yield in loess plateau region of China[J]. *Soil Research*, 2012, 50: 105-113.
- [10] Lal R, Griffin M, Apt J, et al. Ecology - managing soil carbon[J]. *Science*, 2004, 304(5669): 393-393.
- [11] 蔡太义, 贾志宽, 孟 蕾, 等. 渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 43-48.
CAI Tai-yi, JIA Zhi-kuan, MENG Lei, et al. Effects of different rates of straw mulch on soil moisture and yield of spring maize (*Zea mays* L.) in Weibei Highland area, China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 43-48.
- [12] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水
- 分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 60-67.
XIE Wen-yan, FAN Gui-sheng, ZHOU Huai-ping, et al. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11): 60-67.
- [13] 蔡太义, 黄会娟, 黄耀威, 等. 不同量秸秆覆盖还田对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响 [J]. 自然资源学报, 2012, 27 (6): 964-974.
CAI Tai-yi, HUANG Hui-juan, HUANG Yao-wei, et al. Effects of different rates of straw mulching and returning to field on soil labile or organic carbon and carbon pool management index[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 964-974.
- [14] Liu Y, Li S Q, Chen F, et al. Soil water dynamics and water use efficiency in spring maize (*Zea mays* L.) fields subjected to different water management practices on the loess plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(5): 769-775.
- [15] Wang Y, Xie Z, Malhi S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid loess plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(3): 374-382.
- [16] Wu Y, Huang M, Warrington D N. Growth and transpiration of maize and winter wheat in response to water deficits in pots and plots[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 71(1): 65-71.
- [17] 张仁和, 薛吉全, 浦 军, 等. 干旱胁迫对玉米苗期植株生长和光合特性的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(3): 521-528.
ZHANG Ren-he, XUE Ji-quan, PU Jun, et al. Influence of drought stress on plant growth and photosynthetic traits in maize seedlings[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(3): 521-528.
- [18] 赵风华, 王秋凤, 王建林, 等. 小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理[J]. 生态学报, 2011, 31(24): 7526-7532.
ZHAO Feng-hua, WANG Qiu-feng, WANG Jian-lin, et al. Photosynthesis-transpiration coupling mechanism of wheat and maize during daily variation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(24): 7526-7532.
- [19] 高 飞, 贾志宽, 路文涛, 等. 秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 777-783.
GAO Fei, JIA Zhi-kuan, LU Wen-tao, et al. Effects of different straw returning treatments on soil water, maize growth and photosynthetic characteristics in the semi-arid area of Southern Ningxia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 777-783.
- [20] 燕 辉, 胡笑涛, 姚付启. 限量灌溉对冬小麦光合与叶绿素荧光的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 49-54.
YAN Hui, HU Xiao-tao, YAO Fu-qi. Effects of limited irrigation on photosynthesis and fluorescence of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11): 49-54.
- [21] Singh V, Singh G, Bhargavanshi S. Effect of polyethylene mulch on soil nutrient level and root, leaf and fruiting characteristics of mango (*mangifera indica*) [J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 79(6): 411-417.
- [22] Ferrini F, Fini A, Frangi P, et al. Mulching of ornamental trees: Effects on growth and physiology[J]. *Arboriculture and Urban Forestry*, 2008,

- 34(3):157.
- [23] 王 群, 李潮海, 栾丽敏, 等. 不同质地土壤夏玉米生育后期光合特性比较研究[J]. 作物学报, 2005, 31(5):628-633.
- WANG Qun, LI Chao-hai, LUAN Li-min, et al. Photosynthetic characteristics of summer maize (*Zea mays* L.) during the late growth stage in different soil texture[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(5):628-633.
- [24] 盛晋华, 刘克礼. 春玉米叶片光合速率变化规律的研究[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1997, 18(3):43-47.
- SHENG Jin-hua, LIU Ke-li. Studies on the changing pattern of leaf photosynthesis of spring maize[J]. *Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture and Animal Husbandry*, 1997, 18(3):43-47.
- [25] 李永平, 杨改河, 冯永忠, 等. 黄土高原土壤风蚀区玉米起垄覆盖集水效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4):59-65.
- LI Yong-ping, YANG Gai-he, FENG Yong-zhong, et al. Catchment effect of ridging and mulching in maize field in soil wind erosion area of Loess Plateau[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(4):59-65.
- [26] 王庆成, 刘开昌, 张秀青, 等. 玉米的群体光合作用 [J]. 玉米科学, 2001, 9(4):57-61.
- WANG Qing-cheng, LIU Kai-chang, ZHANG Xiu-qing, et al. Canopy photosynthesis of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Maize Sciences*, 2001, 9(4):57-61.
- [27] 王 昕, 贾志宽, 韩清芳, 等. 半干旱区秸秆覆盖量对土壤水分保蓄及作物水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4):196-202.
- WANG Xin, JIA Zhi-kuan, HAN Qing-fang, et al. Effects of different straw mulching quantity on soil water and WUE in semiarid region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(4):196-202.
- [28] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7):15-19.
- GAO Ya-jun, LI Sheng-xiu. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(7):15-19.
- [29] Lal R. Long-term tillage and maize monoculture effects on a tropical alfisol in western nigeria:I. Crop yield and soil physical properties[J]. *Soil & Tillage Research*, 1997, 42(3):145-160.
- [30] Ephraïm J E, Hesketh J D. The effects of drought stress on leaf elongation, photosynthetic and transpiration rates in maize (*Zea mays* L.) leaves[J]. *Photosynthetica*, 1991, 25(4):607-619.
- [31] 蔡太义, 贾志宽, 黄耀威, 等. 不同秸秆覆盖量对春玉米田蓄水保墒及节水效益的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1):238-243.
- CAI Tai-yi, JIA Zhi-kuan, HUANG Yao-wei, et al. Effects of different straw mulch rates on soil water conservation and water-saving benefits in spring maize field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(Suppl. 1):238-243.