

# 河西走廊地区青贮玉米产量形成对灌水量的响应

董继业<sup>1</sup>,牛赞<sup>2\*</sup>,张建喜<sup>1</sup>,王顺利<sup>3</sup>,王钰煊<sup>1</sup>,张飞<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070;2. 淮阴师范学院,江苏 淮安 223300;3. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院,甘肃 张掖 734000)

**摘要:**【目的】探究灌水对河西走廊地区青贮玉米光合日变化、农艺性状及产量的影响,寻求河西灌区青贮玉米最佳灌水量。【方法】以青贮玉米金岭67号为研究对象,于2022年在甘肃民乐县华瑞牧场开展大田试验,设置灌溉处理4个:4 920 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W<sub>1</sub>)、5 535 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W<sub>2</sub>)、6 150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W<sub>3</sub>)、6 765 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W<sub>4</sub>),分析不同灌溉量对青贮玉米抽雄期叶片光合特性、农艺性状及产量的影响。【结果】1) 抽雄期各灌溉处理的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )及叶绿素(SPAD)日均值表现为W<sub>2</sub>>W<sub>3</sub>>W<sub>4</sub>>W<sub>1</sub>,W<sub>2</sub>处理下叶片 $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 及SPAD分别较其他处理增加了7.51%~29.21%、11.91%~47.09%、12.84%~31.82%、6.94%~23.40%和7.65%~11.42%。2) 苗期—拔节期青贮玉米茎粗增长迅速,抽雄期达到稳定,W<sub>2</sub>处理显著高于其他处理( $P<0.05$ ),至成熟期达到最大值,W<sub>2</sub>处理较其他处理增加了6.28~14.17%。苗期—抽雄期青贮玉米株高及叶面积指数增长迅速,抽雄期达到稳定,并以W<sub>2</sub>处理最高,显著高于其他处理( $P<0.05$ ),成熟期W<sub>2</sub>处理较其他处理分别增加了2.95~19.27%和1.57~8.07%。3) 除W<sub>3</sub>处理外,W<sub>2</sub>处理下青贮玉米生物产量与其他处理间差异显著( $P<0.05$ ),W<sub>2</sub>较W<sub>3</sub>增加了0.87%。【结论】在当地传统施肥条件下,灌溉量在5 535 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时青贮玉米的产量最佳。因此,合理的灌溉量有助于作物光合能力的提升,促进干物质的积累,进而有效提高作物的生长状况及产量。

**关键词:**灌溉量;青贮玉米;光合特性;日变化;产量

中图分类号:S513;S548 文献标志码:A 文章编号:1009-5500(2024)06-0208-09

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2024.06.023



近年来,青贮饲料市场需求旺盛,但供应严重不足,因此,大力发展青贮饲料产业,提高其产量,已经成为我国畜牧业发展的一个重要需求<sup>[1]</sup>。青贮玉米是我国主要青贮饲料之一,具有适口性好、营养价值高等重要特点<sup>[2]</sup>。白岚芳等<sup>[5]</sup>研究发现净光合速率( $P_n$ )直接决定青贮玉米产量,且 $P_n$ 、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、叶面积指数与产量的变化趋势一致。光合作

用是光对植物的直接作用,是植物物质积累和能量代谢的重要来源<sup>[3]</sup>,常被认为是表征青贮玉米生长发育状况和生产能力的重要指标<sup>[4]</sup>。在玉米生长的中后期,较高的光合指数和理想的干物质积累与分配,可以更好地增产<sup>[6]</sup>;亦有研究表明在不同生育期内青贮玉米光合特性差异显著<sup>[7]</sup>;也有学者认为,抽雄期作为青贮玉米生长的关键时期,对于提高青贮玉米生物量的积累有着不可替代的作用<sup>[8]</sup>。

土壤水分是作物生长的关键环境因素,水分亏缺或过量都会限制作物生长<sup>[9]</sup>。近年来由于灌溉水资源的不合理利用造成水分利用效率低下。目前有关青贮玉米农艺节水栽培的研究主要集中在水分利用效率(IWUE)方面,如魏永霞等<sup>[10]</sup>通过调亏灌溉对玉米植株与土壤水分变化特征的研究中发现,适宜的水分

收稿日期:2023-10-12;修回日期:2024-04-10

基金资助:甘肃省重点研发计划项目(23YFFG0002);国家自然科学基金项目(32060247);江苏高等学校协同创新计划项目(HSXT30511)

作者简介:董继业(1995-),男,甘肃定西人,硕士研究生。

E-mail:2461162762@qq.com

\*通信作者。E-mail:niuyun2028@163.com

亏缺可以提高作物的产量和水分利用效率,各水分亏缺处理都可以不同程度地降低作物的耗水量;梁哲军等<sup>[11]</sup>通过青贮玉米田间试验发现,随着灌溉定额的减少,灌溉水利用效率呈上升趋势,最小的DI-5 ( $1\ 680\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ )灌溉定额模式下水分利用效率最高;亦有研究表明与正常灌溉相比,适度的缺水和适量的氮肥可以显著增加小麦花前营养器官物质的转运,从而提高产量<sup>[12]</sup>。目前有关青贮玉米灌水的研究主要集中在水分利用效率、生长特性、品质等方面,而在灌水量变化的前提下对其关键生育期光合特性的研究存在较大的不足,亟需补充。

河西位于甘肃省西北部,是我国重要的玉米(*Zea mays*)制种基地和优势产区<sup>[13]</sup>,该地区气候干旱,降雨少,蒸发量大。是典型的干旱内陆河灌区<sup>[14-15]</sup>。近年来,由于区域气候变化和地下水资源的过度使用,导致河流径流减少和地下水位大幅下降<sup>[16]</sup>,进一步加剧了该地区的水资源短缺,因此,在实际灌溉中优化节水灌溉,提高青贮玉米农艺节水栽培技术显得尤为重要。本文参考当地青贮玉米作物传统灌溉量,设置4种灌水梯度,分析不同灌溉处理下青贮玉米抽雄期叶片光合特性及农艺性状在整个生育期之间的差异,进一步阐明适宜的水分亏缺对青贮玉米产量的影响。旨在为河西地区青贮玉米节水灌溉的农业生产方式提供理论参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 样地概况

试验于2022年在张掖市民乐县华瑞牧场( $100^{\circ}22' \sim 101^{\circ}13' \text{ E}, 37^{\circ}56' \sim 38^{\circ}48' \text{ N}$ )进行,试验区属于温带大陆性荒漠草原气候,日照时间长,光热资源丰富,年平均日照时间为2 794 h。年温差大,降水少,蒸发强烈,年平均降水量在351 mm,平均气温 $6.5\ ^{\circ}\text{C}$ ,无霜期140 d。供试土壤质地为沙质土,播种前样地0~30 cm耕层土壤基本肥力状况为:土壤pH值为7.55,土壤容重为 $1.18\ \text{g}/\text{cm}^3$ ,有机质为 $10.13\ \text{g}/\text{kg}$ ,全氮为 $0.70\ \text{g}/\text{kg}$ ,速效磷为 $6.89\ \text{g}/\text{kg}$ ,硝态氮为 $15.31\ \text{mg}/\text{kg}$ 。2022年玉米生育期降水量为181.4 mm(图1)。

### 1.2 试验设计

供试青贮玉米品种为金岭67,种子由甘肃华瑞农业股份有限公司提供,于2022年4月17日播种,2022

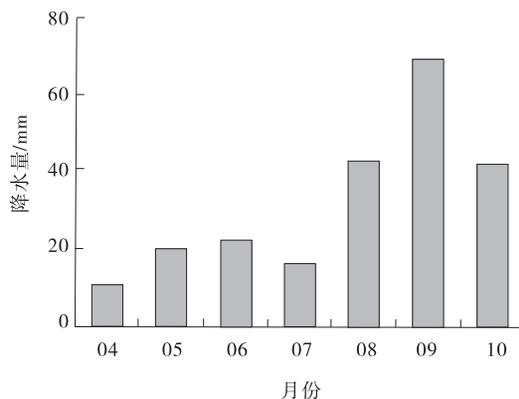


图1 青贮玉米生长期内降水量

Fig. 1 Precipitation during the growth period of silage maize

年9月15日收获。试验采取随机区组设计,根据当地传统灌溉定额( $6\ 150\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ),灌水设置为 $W_1$ (较传统灌溉量节水20%, $4\ 920\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ )、 $W_2$ (较传统灌溉量节水10%, $5\ 535\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ )、 $W_3$ (传统灌水, $6\ 150\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ )和 $W_4$ (较传统灌溉量增水10%, $6\ 765\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ),共计4个处理,每个处理3次重复,共12个小区,小区长25 m,宽1.6 m,面积 $40\ \text{m}^2$ 。播种量为 $11.31\ \text{万株}/\text{hm}^2$ ,株距25 cm,行距50 cm,采取全膜覆盖的种植方式。

灌溉采用膜下滴灌,滴灌带选用内镶贴片式,毛管直径16 mm,壁厚0.2 mm,滴头间距300 mm,滴头流量 $2.2\ \text{L}/\text{h}$ 。滴灌带与青贮玉米种植方向平行,间距为60 cm;各小区均单独安装水表和水阀。各处理在生育期内灌水频数均为21次(表1);施肥采用液压比例施肥泵装置,各小区施肥量均在同一水平并随水施肥,试验所用氮肥为尿素(含N 46%),磷、钾肥采用磷酸二铵(含 $\text{P}_2\text{O}_5$  44%)和硫酸钾(含 $\text{K}_2\text{O}$  57%),分别在拔节期前(5.9%)、拔节期(64.7%)、抽雄期(29.4%)施入,施入总量分别为 $311$ 、 $146$ 、 $107\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,其他管理方式同大田。

### 1.3 测定项目与方法

在青贮玉米苗期(5月10日)、拔节期(6月17日)、抽雄期(7月16日)、吐丝期(8月6日)、成熟期(9月15日)分别选择3株长势一致的植株,采用米尺测量株高,游标卡尺测量茎粗,叶面积指数采用Montgomery法测定<sup>[17]</sup>。

用ZK-CH05型光合测定系统(北京中科维禾仪器公司),采用闭式气路,测定抽雄期穗位叶当日不同时段(8:00、10:00、12:00、14:00、16:00)的光合变化

表1 试验不同处理灌水制度  
Table 1 Different treatment irrigation arrangement in the experiment ( $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ )

处理	灌水量					灌水总量
	苗期(2次)	拔节前(2次)	拔节期(5次)	抽雄期(9次)	成熟期(3次)	
W <sub>1</sub>	263	677	1 482	2 078	420	4 920
W <sub>2</sub>	284	750	1 650	2 393	458	5 535
W <sub>3</sub>	299	810	1 890	2 643	508	6 150
W <sub>4</sub>	315	907	2 062	2 908	573	6 765

特征,各处理3次重复;用TYS-A型便携式叶绿素测定仪(北京中科维禾仪器公司)于抽雄期上午10时测定穗位叶三叶部(叶基部、叶中部、叶上部)的叶绿素值<sup>[18]</sup>,测量环境与光合特性一致。

成熟期青贮玉米干物质质量达到35%及以上时,各小区随机选取3个宽1.5 m,长1 m的样地,保证各样地有相同数量的植株(15株),用称重法测定植株各部位鲜重及总鲜重,换算成公顷鲜产作为青贮玉米公顷产量。用干物质占比乘以鲜重产量得到干物质产量。

#### 1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2021 进行数据处理,用SPSS 27.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和相关性分析(Pearson皮尔逊),用Origin 2022制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌溉量对青贮玉米净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间CO<sub>2</sub>浓度的影响

4种灌溉处理下青贮玉米净光合速率均于11点达到全天的最高值,具体为27.90~40.02  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , W<sub>2</sub>处理下P<sub>n</sub>与W<sub>1</sub>和W<sub>4</sub>处理间存在显著差异( $P<0.05$ ),但W<sub>2</sub>和W<sub>3</sub>处理间差异不显著,随后P<sub>n</sub>开始下调,到13:00时都有所回升。P<sub>n</sub>日平均值(8:00-16:00)分别为W<sub>2</sub>[24.92  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] > W<sub>3</sub>[23.18  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] > W<sub>4</sub>[21.03  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] > W<sub>1</sub>[19.29  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ], W<sub>2</sub>处理较其他处理分别增加了7.51%、18.54%、29.21%(图2-A)。

各灌溉处理下蒸腾速率最高值均出现在中午12:00,但峰值的高低明显不同,具体为12.01~18.20  $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间, W<sub>2</sub>处理下T<sub>r</sub>与其他处理间差异显著( $P<0.05$ ),但W<sub>2</sub>和W<sub>3</sub>处理间差异不显著,随后T<sub>r</sub>均呈下降趋势。T<sub>r</sub>日平均值(8:00-16:00)分别为W<sub>2</sub>[11.80  $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] > W<sub>3</sub>[10.54

$\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] > W<sub>4</sub>[9.69  $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] > W<sub>1</sub>[8.02  $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ], W<sub>2</sub>处理较其他处理分别增加了11.91%、21.79%、47.09%(图2-B)。

各灌溉处理下气孔导度与T<sub>r</sub>变化趋势相似,均在中午12:00达到最高值,具体为0.32~0.46  $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , W<sub>2</sub>处理下G<sub>s</sub>与其他处理间差异显著( $P<0.05$ ),但W<sub>2</sub>和W<sub>3</sub>处理间差异不显著,12:00后各处理G<sub>s</sub>均开始下降。G<sub>s</sub>日平均值(8:00-16:00)分别为W<sub>2</sub>[0.32  $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] > W<sub>3</sub>[0.29  $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] > W<sub>4</sub>[0.25  $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] > W<sub>1</sub>[0.24  $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ], W<sub>2</sub>处理较其他处理分别增加了12.84%、28.89%、31.82%(图2-C)。

各灌溉处理下胞间CO<sub>2</sub>浓度具有与P<sub>n</sub>相反的变化趋势,最高值均出现在上午8:00,具体为170.86~210.48  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ , W<sub>2</sub>处理下C<sub>i</sub>与其他处理间差异显著( $P<0.05$ ),随时间推移各灌溉处理呈上下波动, W<sub>2</sub>处理于下午16:00出现明显的上升。C<sub>i</sub>日平均值(8:00+16:00)分别为W<sub>2</sub>(161.68  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) > W<sub>3</sub>(151.19  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) > W<sub>4</sub>(135.97  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) > W<sub>1</sub>(131.02  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ), W<sub>2</sub>处理较其他处理分别增加了6.94%、18.91%、23.40%(图2-D)。

### 2.2 灌溉量对青贮玉米叶绿素的影响

W<sub>2</sub>处理下叶绿素SPAD值显著高于其他处理( $P<0.05$ )。不同灌溉处理下SPAD均值为W<sub>2</sub>(40.99) > W<sub>3</sub>(38.08) > W<sub>4</sub>(37.16) > W<sub>1</sub>(36.79), W<sub>2</sub>处理较其他处理分别增加了7.64%、10.31%、11.42%(图3)。

### 2.3 灌溉量对青贮玉米农艺性状的影响

青贮玉米各灌溉处理下茎粗均在苗期至拔节期急剧增加,具体为23.47~24.21 mm,抽雄期后各处理增幅减缓,但W<sub>2</sub>处理显著高于其他处理( $P<0.05$ ),在成熟期达到最大值,分别为W<sub>2</sub>(28.28 mm) > W<sub>3</sub>(26.61 mm) > W<sub>4</sub>(25.28 mm) > W<sub>1</sub>(24.77 mm), W<sub>2</sub>

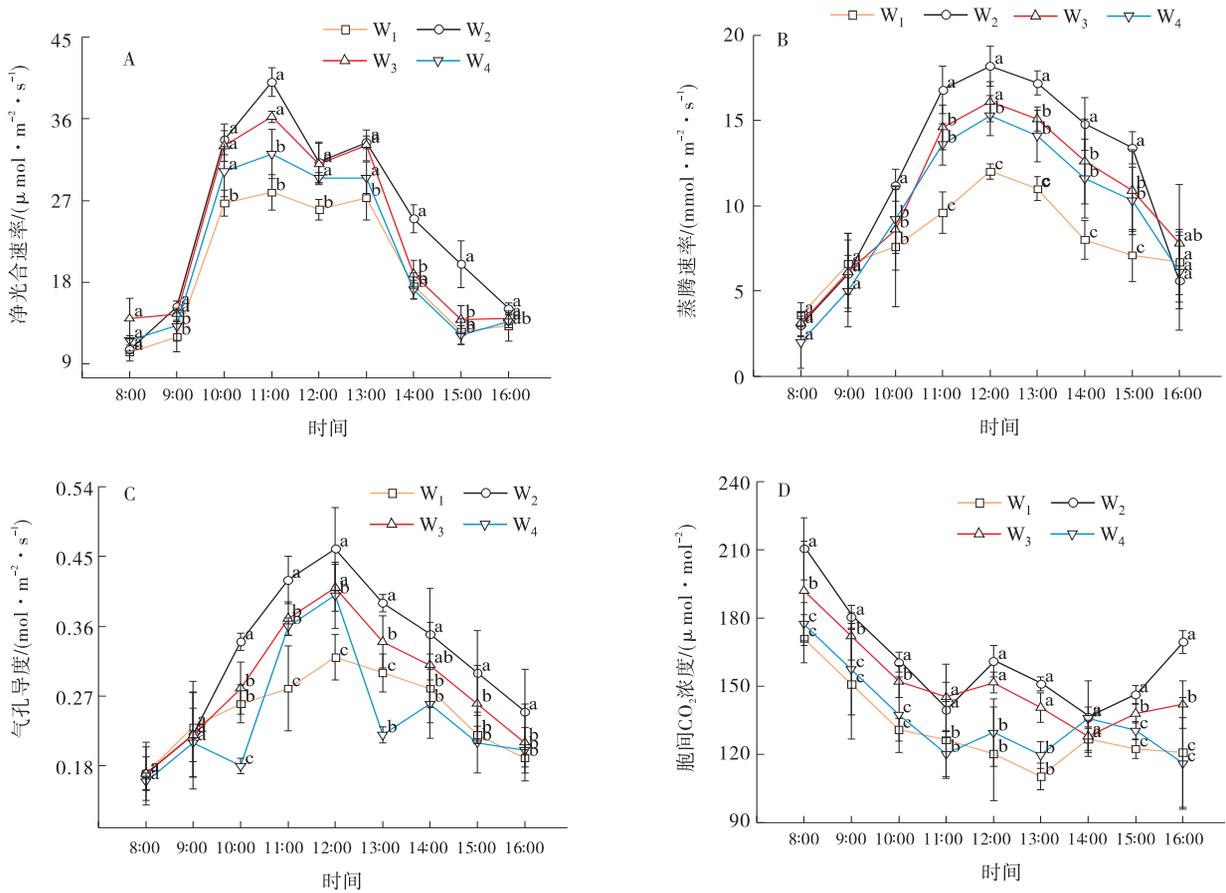


图 2 不同灌溉处理下青贮玉米叶片光合特性

Fig. 2 Photosynthetic characteristics of silage maize leaves under different irrigation treatments

注: W<sub>1</sub>(节水 20%, 4 920 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、W<sub>2</sub>(节水 10%, 5 535 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、W<sub>3</sub>(传统灌水, 6 150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)和 W<sub>4</sub>(增水 10%, 6 765 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)。

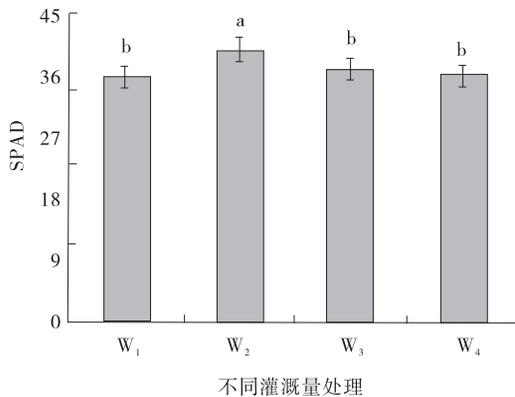


图 3 不同灌溉处理下青贮玉米叶片叶绿素含量

Fig. 3 Chlorophyll content of silage maize leaves under different irrigation treatments

注:不同小写字母表示不同灌溉处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ),下同。

处理较其他处理分别增加了 6.28%、11.87%、14.17%。方差分析表明:W<sub>2</sub>处理与其他处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )(图 4-A)。

青贮玉米各灌溉处理下株高均在苗期至抽雄增

长迅速,其中以 W<sub>2</sub>处理的增幅最大,显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ),具体为 236.02~306.50 cm,抽雄期后各处理增长缓慢,到成熟期达到最大值,分别为 W<sub>2</sub>(330.50 cm) > W<sub>3</sub>(321.02 cm) > W<sub>4</sub>(312.05 cm) > W<sub>1</sub>(277.10 cm),W<sub>2</sub>处理较其他处理分别增加了 2.95%、5.91%、19.27%。方差分析表明:W<sub>2</sub>处理与其他处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )(图 4-B)。

青贮玉米各灌溉处理下叶面积指数整体呈现先升高后降低的趋势,抽雄期各处理出现峰值,其中以 W<sub>2</sub>处理的增幅最大,具体为 24.28~27.55 cm<sup>2</sup>,W<sub>2</sub>与其他处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。抽雄期至吐丝期各处理叶面积指数逐渐下降,到成熟期达到稳定,分别为 W<sub>2</sub>(21.95 cm<sup>2</sup>) > W<sub>3</sub>(21.61 cm<sup>2</sup>) > W<sub>1</sub>(20.60 cm<sup>2</sup>) > W<sub>4</sub>(20.31 cm<sup>2</sup>),W<sub>2</sub>处理较其他处理分别增加了 1.57%、6.55%、8.07%。方差分析表明:W<sub>2</sub>处理显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ),但 W<sub>2</sub>和 W<sub>3</sub>处理间差异不显著(图 4-C)。

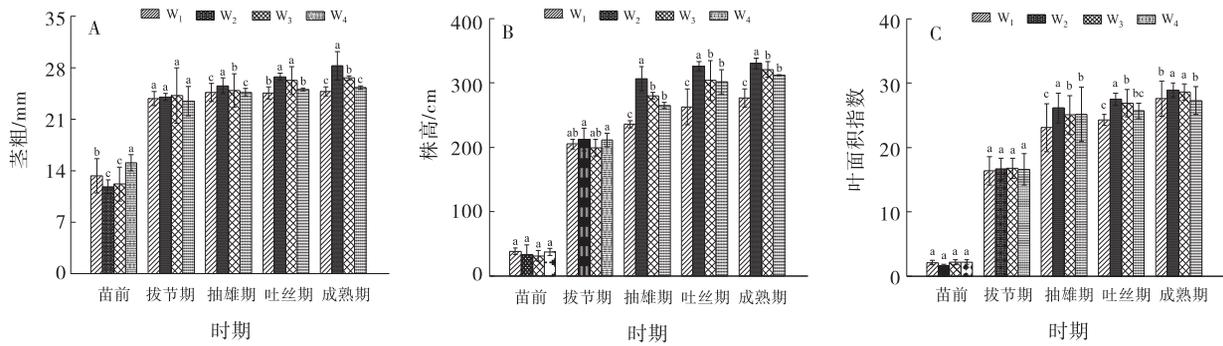


图4 不同灌溉处理下青贮玉米生育期茎粗、株高及叶面积指数的变化趋势

Fig. 4 Change trend of stem diameter, plant height and leaf area index of silage maize at growth stage under different irrigation treatments

2.4 灌溉量对青贮产量及其构成要素的影响

青贮玉米生物产量与干物质产量均表现为  $W_2 > W_3 > W_4 > W_1$ ,  $W_2$  处理较其他处理分别增加了 0.87%、17.59%、21.27% 与 4.96%、11.62%、23.64% (表 2)。  $W_2$  处理下生物产量与  $W_1$  和  $W_4$  处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 但  $W_2$  和  $W_3$  处理差异不显著;  $W_2$  处理下干物质产量与  $W_1$  处理差异显著 ( $P < 0.05$ )

但较  $W_3$  和  $W_4$  差异不显著。

产量构成要素方面, 青贮玉米茎秆生物产量以  $W_3$  处理最高, 为  $54.30 \text{ t/hm}^2$ ,  $W_2$  和  $W_3$  处理间差异不显著; 各处理的叶生物产量无显著差异; 果穗生物产量以  $W_2$  处理最高, 为  $41.34 \text{ t/hm}^2$ 。  $W_2$  和  $W_3$  处理间差异不显著。

表 2 灌溉量对青贮玉米产量及其构成要素的影响

Table 2 Effects of irrigation amount on yield and yield composition of silage maize ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

处理	茎重	叶重	穗重	生物产量	干物质产量
$W_1$	$42.63 \pm 0.79^c$	$15.60 \pm 0.95^a$	$33.36 \pm 2.05^b$	$91.58 \pm 0.77^b$	$27.20 \pm 1.60^b$
$W_2$	$54.03 \pm 1.46^a$	$15.68 \pm 0.20^a$	$41.34 \pm 1.68^a$	$111.06 \pm 1.39^a$	$33.63 \pm 1.21^a$
$W_3$	$54.30 \pm 0.96^a$	$15.43 \pm 0.44^a$	$40.38 \pm 1.97^a$	$110.10 \pm 0.59^a$	$32.04 \pm 1.65^{ab}$
$W_4$	$48.42 \pm 1.45^b$	$13.97 \pm 0.40^a$	$32.06 \pm 2.21^b$	$94.45 \pm 1.06^b$	$30.13 \pm 0.57^a$

注: 不同小写字母表示不同滴灌处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

2.5 光合特性与农艺性状间的相关性分析

$P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  间均存在极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ); SPAD 与  $C_i$  呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与茎粗、株高及生物产量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ );  $P_n$  与株高呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ); 茎粗、株高与生物产量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。  $C_i$  与  $P_n$ 、 $T_r$  和  $G_s$  间均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ); SPAD 与  $P_n$ 、 $T_r$  和  $G_s$  均呈显著负相关 ( $P < 0.05$ );  $P_n$ 、 $T_r$  与叶面积和茎粗呈不同程度的显著负相关 ( $P < 0.05$ ) (图 5)。

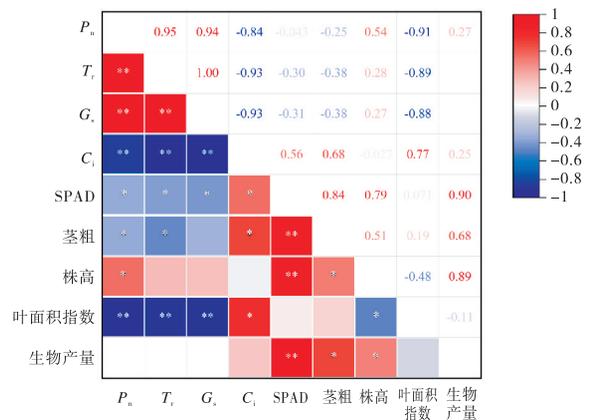


图 5 光合特性与农艺性状间的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between photosynthetic characteristics and agronomic traits

注:  $P_n$  净光合速率,  $T_r$  蒸腾速率,  $G_s$  气孔导度,  $C_i$  胞间二氧化碳浓度, SPAD 叶绿素含量; \*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.01$ ), \* 表示显著相关 ( $P < 0.05$ )。

3 讨论

3.1 灌溉量对青贮玉米光合特性影响

光合作用是植物将太阳能转化为化学能的过程<sup>[19]</sup>, 是物质生产的基础。光合日变化是植物物质积累和生理代谢的基本单位, 也是分析植物生长和代谢

过程对外界环境响应的重要方法<sup>[20]</sup>。本研究表明,不同灌溉条件下青贮玉米均发生光合午休现象,在W<sub>2</sub>处理下P<sub>n</sub>、T<sub>r</sub>、G<sub>s</sub>和C<sub>i</sub>显著高于其他处理(P<0.05),但各光合特性指标并未随灌溉量的增加而增加,当灌溉量超过(6 150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)时不利于光合特性的提升。这与前人<sup>[21]</sup>的研究结果一致。呈现出这种规律可能是因为水分胁迫主要通过气孔和非气孔因素调控叶片的光合特性,当水分适宜时,气孔导度上升,提高了作物的叶面积指数,增加了相应的遮荫面积,从而在一定程度上提升了作物的光合能力;而过多的水分可能导致土壤通气性变差,减少植物气孔的开放程度,使得土壤中氧气供应不足而产生缺氧现象,这会抑制根系的呼吸作用和代谢活动,从而影响整个植株的光合能力<sup>[22-23]</sup>。相关性分析(图5)也表明,青贮玉米的P<sub>n</sub>、T<sub>r</sub>在不同灌溉条件下与G<sub>s</sub>存在极显著正相关(P<0.01)关系,进一步证实了G<sub>s</sub>是影响玉米光合速率的关键因素。而在W<sub>2</sub>处理下青贮玉米光合特性显著降低,这可能是因为水分亏缺使青贮玉米的光合特性下降,在11:00—12:00期间PAR升至全天最高值,强光条件使青贮玉米通过一系列光保护机制来消散多余的光能,从而降低净光合速率<sup>[23]</sup>,即非气孔因素是导致该时期叶片光合作用下调的主要因素。

SPAD是植物对水分胁迫敏感的生理指标之一,它能在一定程度上反映植物结合物质的能力<sup>[24]</sup>。研究中W<sub>2</sub>处理下青贮玉米SPAD值显著高于其他处理(P<0.05),与W<sub>3</sub>处理相比提高了0.87%,当灌溉量超过(6 150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)时SPAD值开始下降,这是因为适宜的灌溉条件不仅可以增加植物叶片中叶绿素的含量及其覆盖面积,而且还能有效提高叶片对光能的吸收和利用效率;而过多的灌溉量会使土壤过于湿润,降低土壤通气性,进而影响根系的氧气供应,抑制叶绿素的合成和光合作用的进行<sup>[25]</sup>。同时叶绿素含量与P<sub>n</sub>呈显著相关关系(P<0.05)也证实了这一结论。

### 3.2 灌溉量对青贮玉米农艺性状的影响

作物的株高、茎粗、叶面积指数等是直接反映植物生长发育的基本指标,其对灌溉量的响应效果显著<sup>[26]</sup>。本研究发现,青贮玉米在生长初期,W<sub>4</sub>处理下茎粗、株高及叶面积指数略高于其他处理,且各处理间差异不显著,而自抽雄期开始,W<sub>2</sub>处理一直保持较

高水平,当灌溉量超过(6 150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)时青贮玉米各项生长指标均呈下降趋势。这与董越等<sup>[27]</sup>的研究结果一致,这可能是由于不同生育阶段发生水分胁迫会不同程度的影响青贮玉米的生长<sup>[28]</sup>,苗期增水处理的生长指标较高,表明在生长初期增水灌溉有助于青贮玉米生长,而随着生育期的推进,适度水分亏缺却有助于青贮玉米中后期生长,一方面很可能是因为氮素在生长期保持较高水平,有效减轻水分胁迫对青贮玉米生长发育的影响,进而提高青贮玉米各项生长指标<sup>[29]</sup>。另一方面,茎粗和叶面积指数对滴灌量的响应存在差异,但是都有一定阈值。当灌溉量超过一定量时,青贮玉米的株高、叶面积指数会降低或不再有显著变化,另外,水分过多会使土壤的含氧量下降,导致植物呼吸困难<sup>[30]</sup>,从而在一定程度上抑制植物根系的生长。

### 3.3 灌溉量对青贮玉米产量及其构成要素的影响

光合作用为作物产量形成提供了主要物质基础,90%以上的干物质来自光合作用生产<sup>[31]</sup>。刘晓等<sup>[32]</sup>研究表明株高和茎粗对玉米植株的生长势至关重要,较高的植株高度以及较粗的茎秆具有较强的植株生长势,从而影响青贮玉米产量。本研究中,W<sub>2</sub>处理下青贮玉米产量显著高于其他处理,这主要是由于W<sub>2</sub>处理下青贮玉米光合能力、茎重、穗重、叶重增加所致<sup>[33]</sup>,通过提高青贮玉米的净光合速率和水分利用效率,使青贮玉米茎粗、株高、叶面积指数、地上生物量等在抽雄期时显著增加,进而使青贮玉米的产量提高。此外,相对于W<sub>2</sub>处理而言,W<sub>1</sub>处理对青贮玉米产量及其构成要素的影响并不显著,这表明从节水角度来看,W<sub>1</sub>处理并非最佳模式,这与其他作物研究的结论相类似<sup>[34]</sup>。加孜拉等<sup>[35]</sup>研究表明灌溉量与青贮玉米产量的呈二次抛物线关系,产量随着灌溉量的增加而增加,当灌溉定额增加到一定程度时,产量反而降低。王连君等<sup>[36]</sup>研究发现,当灌水量超过某一临界值时,再继续增加灌水量,只会导致投入量增大,而产量、品质却有所下降。以上结论与本研究结果一致,当灌溉量超过(6 150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)时青贮玉米产量呈下降趋势,这主要是由于过度灌溉导致根际土壤养分浓度稀释,并伴随着养分流失,使得农作物能够吸收和利用的养分受到限制,最终影响农作物的干物质积累<sup>[37-38]</sup>。

## 4 结论

抽雄期青贮玉米叶片  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  及 SPAD 值均在  $W_2$  处理下最高; 苗期至拔节期, 各灌溉处理下青贮玉米茎粗、株高及叶面积指数无显著差异, 抽雄期至吐丝期, 除  $W_3$  处理外,  $W_2$  处理显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ );  $W_2$  处理有助于青贮玉米产量及其构成要素的增长, 但相较于  $W_2$  处理而言,  $W_3$  处理对青贮玉米产量及其构成要素影响不显著。

在当地传统施肥条件下, 合理的灌溉量能有效提高青贮玉米抽雄期叶片 SPAD 值, 增强叶片的光合特性, 促进光合产物的转运与分配, 进而提高产量, 特别是能够提高产量构成要素中茎、叶以及穗的比重。因此灌溉量在  $W_2$  处理 ( $5\ 535\ m^3/hm^2$ ) 下青贮玉米产量最佳。

### 参考文献:

- [1] 王久龙, 王振华, 李文昊, 等. 施氮量对复播青贮玉米光合特性和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 250—255.
- [2] 严典波, 陈超. 青贮饲料在养牛中的应用探讨[J]. 畜禽业, 2021, 32(8): 58+60.
- [3] 王力, 顾浩, 李嘉亮, 等. 氮肥配施生物炭对坡耕地烤烟/青贮玉米套作生物量和光合特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(6): 985—992.
- [4] 李智, 尹娟, 周乾, 等. 宁夏黄土高原区滴灌青贮玉米灌溉参数试验研究[J]. 节水灌溉, 2017(1): 5—8.
- [5] 白岚方, 张向前, 张德健, 等. 不同施氮水平下青贮玉米农田土壤酶活性时空分布特征[J]. 土壤通报, 2022, 53(5): 1088—1097.
- [6] 白岚方, 路战远, 张向前, 等. 不同玉米品种灌浆期穗位叶光合特性日变化及青贮产量差异研究[J]. 河南农业科学, 2020, 49(4): 29—37.
- [7] 胡娜, 袁天佑, 闫军营, 等. 腐殖酸与化肥配施对冬小麦光合特性的影响[J]. 河南农业, 2021(19): 18.
- [8] Qi D, Hu T, Liu T. Biomass accumulation and distribution, yield formation and water use efficiency responses of maize (*Zea mays* L.) to nitrogen supply methods under partial root-zone irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2020, 230: 105981.
- [9] 石磊, 吕宁, 陈云, 梁飞. 不同灌溉措施下春玉米干物质和养分积累分配特征及其与产量建成的相关性[J]. 玉米科学, 2021, 29(2): 103—108, 116.
- [10] 魏永霞, 马瑛瑛, 刘慧, 等. 调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 252—260.
- [11] 梁哲军, 齐宏立, 王玉香, 等. 不同滴灌定额对玉米光合性能及水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(36): 74—78.
- [12] 王旭敏, 雒文鹤, 刘朋召, 等. 节水减氮对夏玉米干物质和氮素积累转运及产量的调控效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3183—3197.
- [13] 董姗, 王皓, 贾倩民, 等. 灌溉模式与种植方式对河西地区青贮玉米生长、产量和经济效益的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(4): 1111—1120.
- [14] 杨君林, 马忠明, 张立勤, 等. 甘肃省河西绿洲干旱灌区施氮量对小麦—玉米间作水分利用和产量的影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(3): 176—180.
- [15] 张雪婷, 王新永, 杨文雄, 等. 河西绿洲灌区节水抗旱型玉米品种的评价方法探讨[J]. 草业学报, 2020, 29(2): 134—148.
- [16] 谢明君, 李广, 马维伟, 等. 水分对河西青贮玉米土壤化学计量比及稳态性的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1312—1321.
- [17] 单宁, 田军仓, 闫新房, 等. 水肥热耦合对滴灌青贮玉米生长、光合及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2021(9): 12—17.
- [18] 梁永松, 钱晓刚, 王美, 等. 旱地宽厢宽带玉米灌浆期穗位叶光合特性分析[J]. 耕作与栽培, 2007(3): 10—10, 44.
- [19] 刘小龙, 冯国瑞, 张新疆, 等. 干旱区滴灌玉米出苗期施用启动磷肥的增产效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(10): 1937—1946.
- [20] 胡敏杰, 姜良超, 李守中, 等. 覆膜与滴灌对河套灌区玉米花粒期叶片光合特征的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 28(12): 3955—3964.
- [21] Zhao W, Sun Y, Kjellgren R, et al. Response of stomatal density and bound gas exchange in leaves of maize to soil water deficit[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37(1): 1704.
- [22] 王同朝, 李小艳, 李仟, 等. 秸秆覆盖和土壤水分互作对夏玉米水分利用效率及产量的影响[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(3): 280—287.
- [23] 解婷婷, 苏培玺, 丁松爽. 黑河中游边缘绿洲不同水分条件对青贮玉米叶片光合特性及产量的影响[J]. 西北农

- 业学报,2009,18(6):127-133.
- [24] 姜良超,李守中,宁秋蕊,等.河套灌区不同膜下滴灌方式对玉米拔节期光合日变化的影响[J].亚热带资源与环境学报,2016,11(2):22-31.
- [25] 李永秀,申双和,李丽,等.土壤水分对冬小麦生育后期叶片气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J].生态学杂志,2012,31(1):74-80.
- [26] 董越.水氮互作对青贮玉米产量和水氮利用效率的影响研究[D].保定:河北农业大学,2021.
- [27] 董越,陈任强,高惠嫣,等.青贮玉米生长、耗水、产量和水分利用效率对水氮供应的响应研究[J].河北农业大学学报,2021,44(4):13-20.
- [28] 王雅楠.不同滴灌量对青贮玉米光合特性及产量品质的影响研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2020.
- [29] 李广浩,赵斌,董树亭,等.控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J].作物学报,2015,41(9):1406-1415.
- [30] 李淑艳,秦伟娜,焦婷,等.雨养区和灌溉区不同青饲玉米品种的生产性能及光合特性[J].草业科学,2022,39(7):1429-1440.
- [31] 唐江华,苏丽丽,李亚杰,等.不同耕作方式对复播大豆光合特性、干物质生产及经济效益的影响[J].应用生态学报,2016,27(1):182-190.
- [32] 刘晓,王博,朱晓艳,郭晓洁,等.21个粮饲兼用型青贮玉米在河南的品种比较试验[J].草业学报,2019,28(8):49-60.
- [33] 曹玉军,魏雯雯,徐国安,等.半干旱区不同地膜覆盖滴灌对土壤水、温变化及玉米生长的影响[J].玉米科学,2013,21(1):107-113.
- [34] 管瑶,贺兴宏,雷廷武.用有理设计方法优选地表滴灌滴头流量合理性分析[J].中国农业大学学报,2019,24(10):109-117.
- [35] 加孜拉,白云岗,曹彪.北疆寒旱区不同水分处理对膜下滴灌青贮玉米植株生长与产量的影响[J].中国农学通报,2019,35(16):6-14.
- [36] 王连君,王程翰,乔建磊,等.膜下滴灌水肥耦合对葡萄生长发育、产量和品质的影响[J].农业机械学报,2016,47(6):113-119,92.
- [37] 黄佳媛,卢轩,李天琦,等.不同灌溉施肥条件对紫花苜蓿株高、产量及肥料利用效率的影响[J].草原与草坪,2022,42(5):46-53.
- [38] 姜良超,仝川,胡敏杰,等.河套灌区玉米光合特征及产量对全膜覆盖下不同滴灌量的响应[J].水土保持学报,2017,31(4):289-297+319.

## Response of yield formation of silage maize to irrigation amount in Hexi Corridor irrigation area

DONG Ji-ye<sup>1</sup>, NIU Yun<sup>2</sup>, ZHANG Jian-xi<sup>1</sup>, WANG Shun-li<sup>3</sup>, WANG Yu-ying<sup>1</sup>,  
ZHANG Fei<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China; 3. Qilian Mountain Water Conservation Forest Research Institute of Gansu Province, Zhangye 734000, China)

**Abstract:** [Objective] This study aimed to evaluate the effects of different irrigation rates on the diurnal variation of photosynthesis, agronomic traits, and yield of silage maize in Hexi Corridor irrigation area, to identify the optimal irrigation rate. [Method] A field experiment was conducted in 2022 at Huarui farming, Minle county, Gansu province, China, using silage maize (Jinling 67) as the research material. Four irrigation rates were applied: 4 920 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W<sub>1</sub>), 5 535 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W<sub>2</sub>), 6 150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W<sub>3</sub>) and 6 765 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W<sub>4</sub>). The effects of irrigation on the photosynthetic characteristics, agronomic traits, and yield of silage maize were analyzed. [Result] (1) The daily averages of net photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), intercellular CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ), and chlorophyll (SPAD) followed the trend  $W_2 > W_3 > W_4 > W_1$ . The W<sub>2</sub> treatment increased  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$ ,  $C_i$ , and

SPAD by 7.51%~29.21%, 11.91%~47.09%, 12.84%~31.82%, 6.94%~23.40%, and 7.65%~11.42%, respectively, compared to other treatments. (2) The stem diameter of silage maize increased rapidly from the seedling to jointing stage, with  $W_2$  significantly higher than other treatments ( $P<0.05$ ) and reaching its maximum at maturity.  $W_2$  treatment resulted in 6.28%~14.17% increase in stem diameter. Plant height and leaf area index also increased rapidly until the tasseling stage, where  $W_2$  treatment was significantly higher ( $P<0.05$ ), showing increases of 2.95%~19.27% and 1.57%~8.07%, respectively, at maturity compared to other treatments. (3) The  $W_2$  treatment significantly increased the biomass of maize silage ( $P<0.05$ ). Specifically, the  $W_2$  treatment showed an increase of 0.87% compared to the  $W_3$  treatment. **【Conclusion】** An irrigation rate of 5 535 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> yielded the highest silage maize production under local traditional fertilization conditions. Adequate irrigation enhances crop photosynthetic capacity, promotes dry matter accumulation, and improves growth conditions and yield of crops.

**Key words:** irrigation; silage maize; photosynthetic properties; daily variation; yield

(责任编辑:刘建荣)