

杨芳欣,张雅静,张向前,等. 北方农牧交错区滴灌梯度对玉米吐丝期光合特征及干物质积累的影响[J]. 山西农业科学, 2025, 53(1):55-63.

YANG F X, ZHANG Y J, ZHANG X Q, et al. Impact of drip irrigation gradient on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of maize at tasseling-silking stage in northern agro-pastoral ecotone[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(1):55-63.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.01.06

北方农牧交错区滴灌梯度对玉米吐丝期 光合特征及干物质积累的影响

杨芳欣^{1,2}, 张雅静¹, 张向前^{1,2}, 戎美仁^{1,2}, 赵娜¹, 王伟妮³, 郝永河⁴, 马达灵¹

(1. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区农牧业科学院植物保护研究所/
内蒙古自治区退化生态修复与污染防治重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010031; 3. 鄂尔多斯农牧业生态与资源保护中心,
内蒙古鄂尔多斯 017200; 4. 鄂尔多斯市农牧技术推广中心, 内蒙古鄂尔多斯 017200)

摘要:为探究北方农牧交错区滴灌梯度对玉米吐丝期光合特征变化及干物质积累的影响,以玉米先玉335为材料,以在内蒙古自治区农牧业科学院开展的水分定位试验为基础,设置315(W1)、645(W2)、945(W3)、1275(W4)、1605(W5)m³/hm²共5个滴灌梯度,研究不同滴灌梯度对玉米吐丝期光合特征、光响应曲线、干物质积累量及经济产量的影响。结果表明,随滴灌量增加,光合速率、气孔导度、蒸腾速率呈先升高后降低的单峰曲线变化,胞间CO₂浓度呈“V”字形曲线变化,且光响应曲线拟合较好,W4处理的气孔导度、胞间CO₂浓度、光响应曲线表现均优于其他处理。随着滴灌量增加,玉米植株干物质质量呈现逐渐增长的趋势,W4和W5处理均表现良好,W4和W5处理下干物质积累量分别为16625.25、18525.00 kg/hm²,经济产量分别为17650.54、17829.49 kg/hm²。结合收获指数及水分利用效率可以看出,W4处理表现更优;从干物质积累和产量上来看,北方农牧交错区种植玉米时,采用1275 m³/hm²滴灌量较为适宜。

关键词:北方农牧交错区;滴灌梯度;玉米;光合特征;光响应曲线;干物质积累

中图分类号:S513 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2481(2025)01-0055-09

Impact of Drip Irrigation Gradient on Photosynthetic Characteristics and Dry Matter Accumulation of Maize at Tasseling-Silking Stage in Northern Agro-Pastoral Ecotone

YANG Fangxin^{1,2}, ZHANG Yajing¹, ZHANG Xiangqian^{1,2}, RONG Meiren^{1,2},
ZHAO Na¹, WANG Weini³, HAO Yonghe⁴, MA Daling¹

(1. College of Agricultural, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Institute of Plant Protection, Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences of Inner Mongolia Autonomous Region/Key Laboratory of Degradation Ecological Restoration and Pollution Control of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010031, China; 3. Ordos Agriculture and Animal Husbandry Ecology and Resource Protection Center, Ordos 017200, China; 4. Ordos City Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center, Ordos 017200, China)

Abstract: In order to investigate the impact of drip irrigation gradient on the variations in photosynthetic characteristics and dry matter accumulation at the tasseling-silking stage of maize in the northern agro-pastoral ecotone, in this study, a maize

收稿日期:2024-05-15

基金项目:中央创新引导项目(2022ZY0216);2023草原英才个人培养滚动支持项目(CY2024015);鄂尔多斯市揭榜挂帅项目(JBGS-2021-001)

作者简介:杨芳欣,在读硕士,研究方向:土壤耕作和农田生态,E-mail:1843244575@qq.com

通信作者:张向前,研究员,博士,主要从事土壤耕作和农田生态研究,E-mail:zhangxiangqian_2008@126.com

马达灵,教授,博士,主要从事寒旱区作物栽培生理生态研究,E-mail:madaling@sina.com

variety Xianyu 335 was selected as the material, based on the water localization experiment conducted at the Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences of Inner Mongolia Autonomous Region, five drip irrigation gradients of 315 m³/ha (W1), 645 m³/ha (W2), 945 m³/ha (W3), 1 275 m³/ha (W4) and 1 605 m³/ha (W5) were set to study the impact of different drip irrigation gradients on photosynthetic characteristics, light response curve, and dry matter accumulation, and economic yield at the tasseling-silking stage of maize. The results showed that the photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate of each treatment increased first and then decreased with the increase of drip irrigation amount, the intercellular CO₂ concentration changed in a "V" shape curve, and the light response curve was well fitted. Among the treatments, the performance of stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, and light response curve of W4 treatment were better than those of other treatments. With the increase of drip irrigation amount, the dry matter mass of maize plants showed a trend of gradually increasing, the performance of dry matter accumulation under W4 and W5 treatments was excellent and was 16 625.25 kg/ha and 18 525.00 kg/ha, respectively, and the economic yield was 17 650.54 kg/ha and 17 829.49 kg/ha, respectively. Combined with the harvest index and water use efficiency, it could be seen that the performance of W4 treatment was better. From the perspective of dry matter accumulation, when maize was planted in the northern agro-pastoral ecotone, and the drip irrigation amount of 1 275 m³/ha was more suitable for application.

Keywords: northern agro-pastoral ecotone; drip irrigation gradient; maize; photosynthetic characteristic; light response curve; dry matter accumulation

水资源匮乏属于全球性问题,给全球农业发展带来巨大挑战。我国水资源分布特征主要为南方充足,北方短缺^[1]。北方农牧交错区属于东北、西北和华北地区的生态过渡地区^[2],在农业发展中发挥重要作用。农作物的生长发育需要消耗大量水分,干旱会造成农作物生长变缓,产量降低^[3]。内蒙古水资源在地区、时空的分布上很不均匀,是我国典型的干旱半干旱地区,分布大面积的灌溉农田^[4]。内蒙古自治区东部地区水资源相对较为丰富、中西部地区匮乏,因此,水资源合理利用对于内蒙古中西部农业发展十分重要。对此需要制定节水方案,选用合适的灌溉量以提高玉米水分利用效率。内蒙中西部玉米种植采用滴灌方式,相对于漫灌,能有效实现节水 47.37%~53.64%^[5],提高玉米水分利用效率的同时实现作物高产,达到节水与高产的双赢。深入了解玉米关键生长发育时期与水分利用之间的关系,以及对产量的影响,特别是对玉米生长影响较大的抽雄-吐丝期,是提高用水效率的有效途径之一^[6]。

近年来,我国玉米产量与出口量不断增长,玉米总产量位居世界第 2,玉米出口量位居世界第 4^[7]。玉米是内蒙古第一大作物,内蒙古玉米生产对全国玉米产业发展至关重要^[8]。水分会对玉米干物质及产量的形成造成实质性的影响^[9]。且不同生育期、不同程度的干旱胁迫都会对玉米产量造成很大影响。有研究表明,玉米进入吐丝期后,干旱胁迫效应明显,土壤质量含水率显著低于正常供水地段^[10]。生育期后期玉米需水量增大,水

分亏缺会导致玉米生长指标下降,产量相对下降 0.28%~3.51%^[11]。在玉米吐丝期,叶片的光合速率与干物质积累量呈正相关^[12]。所以,提高此时期的光合速率是提升干物质积累量的有效途径。玉米全生育期需水为 435~600 mm^[13]。拔节期过后玉米营养生长与生殖生长同时进行。玉米植株不仅生长速度加快,而且干物质积累也迅速增加,需水量也相应逐渐增大,直到抽雄期达到顶峰^[14]。此时是玉米需水的关键时期,要保障水分的供应,避免出现“卡脖旱”的情况。有研究表明,在适度减少灌溉量的情况下保证玉米产量不减少,可以有效提高水分利用效率^[15-16]。关于滴灌梯度对玉米吐丝期光合生理特征及干物质差异性的影响研究较少,特别是对玉米产量影响较大的吐丝期。

本研究针对不同滴灌梯度对玉米吐丝期光合特征及干物质积累的影响,旨在为北方农牧交错区发展节水农业和提高玉米产量提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验位于内蒙古自治区呼和浩特市内蒙古自治区农牧业科学院院内试验基地(40°82'N,111°65'E,海拔 1040 m),属于中温带干旱半干旱大陆性季风气候,夏季短暂少雨炎热,冬季漫长少雪干冷,昼夜温差较大,四季气候变化显著。该地 2019 年 4—10 月最高温度为 32.7℃,最低温度为 -4.8℃,年平均气温 7.3℃。日照时数为 1759.2 h。年平均最高气温 13.7℃,年平均最低气温 1.5℃,年日最高

气温 $\geq 30.0^{\circ}\text{C}$,平均日数 28 d,年平均相对湿度 52%。年降水量较低,降水主要集中在 7—9 月;年平均降水量 396.5 mm,2019 年降水量 406.1 mm。2019 年玉米生育时期各月平均气温及降水量如图 1 所示。试验土壤为棕壤土,最大田间持水量为 23%~25%,pH 值 7.89,土壤有机质 17.68 g/kg,土壤碱解氮 19.25 mg/kg,土壤全磷 0.87 g/kg,土壤速效磷为 28.7 mg/kg,土壤速效钾 53.58 mg/kg,前茬作物为玉米。

1.2 试验材料

春玉米试供品种为先玉 335(铁岭先锋种子研究有限公司)。滴灌管主管 63 mm,副管 32 mm,毛管直径 16 mm,滴灌孔间距 20 cm,滴头流量 3.0 L/h,工作压力 0.1 MPa(新疆天业节水灌溉股份有限公司)。

1.3 试验设计

试验于 2019 年 4 月播种,种植密度为 7.5 万株/hm²。全生育期共设 315(W1)、645(W2)、945(W3)、1 275(W4)、1 605(W5)m³/hm² 5 个梯度水平。共 15 个小区,小区面积 28 m²。3 次重复。2018 年冬季统一冬灌。生育期灌溉方式为滴灌,在 6 月 25 日、7 月 15 日、8 月 10 日进行灌水,使用 1 条滴灌带控制 1 行玉米,滴灌带距离玉米种植行 5 cm 左右。其他管理方式同大田。各处理的灌水量如表 1 所示。

表 1 不同处理的滴灌量

Tab.1 Amount of drip irrigation in different treatments

月份 Month	滴灌量 Drip irrigation amount m ³ /hm ²				
	W1	W2	W3	W4	W5
6	105	215	315	425	535
7	105	215	315	425	535
8	105	215	315	425	535
总计 Total	315	645	945	1 275	1 605

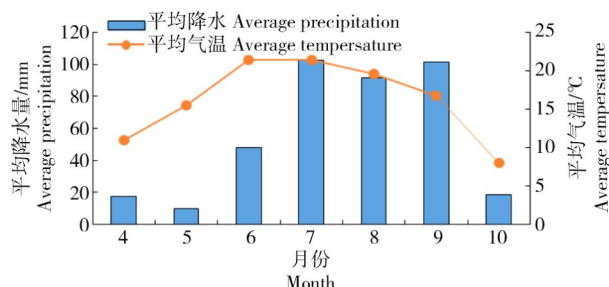


图 1 2019 年 4—10 月平均降水量和平均气温

Fig.1 Average precipitation and average temperature from April to October in 2019

1.4 测定指标与方法

1.4.1 吐丝期光合性能指标日变化 使用美国 LI-6800 便携式光合仪,选择晴朗无风天,在 6:00、8:00、10:00、12:00、13:00、14:00、16:00、18:00 时,测定叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率等参数。

1.4.2 光响应曲线 使用美国 LI-6800 便携式光合仪测定光响应曲线,设定光强梯度为 0、200、400、600、800、1 000、1 200、1 300、1 400、1 600、1 800、2 000 μmol/(m²·s),选取长势均匀健康的 3 株玉米,测定穗位叶片的光响应曲线,每个光强适应时间大约为 2 min。

1.4.3 植株干物质积累 在玉米吐丝期每个小区选取长势均匀健康的 3 株玉米,用卷尺测量株高,将植株茎叶鞘 105 °C 杀青 30 min,85 °C 烘干至恒重,测定干物质积累量。

1.4.4 模拟方程 利用非直角双曲线模型对穗位叶片的净光合速率(Pn)和光合有效辐射(PAR)之间的关系进行分析^[17-18],其模拟公式为:

$$Pn = (Q \times PAR + P_{\max} - \text{SQRT}((Q \times PAR + P_{\max}) \times (Q \times PAR + P_{\max}) - 4Q \times PAR \times K \times P_{\max})) / (2K - Rd) \quad (1)$$

式中, $P_{\max}$ 表示最大净光合速率; Q 表示表观量子效率; Rd 表示暗呼吸速率; K 表示光响应曲线曲角。

光饱和点(Light saturation point,LSP)的模拟公式:

$$LSP = (P_{\max} + Rd) / Q \quad (2)$$

光补偿点(Light compensation point,LCP)的模拟公式:

$$LCP = Rd / Q \quad (3)$$

产量测定方法:

$$\text{生物产量} : y = \frac{c \times 75\,000}{1\,000} \quad (4)$$

式中, c (g)为单株干质量;75 000(株/hm²)为播种密度。

$$\text{经济产量} : Y = \frac{e \times 75\,000}{20} \times \frac{100 - f}{100} \div 0.86 \quad (5)$$

式中, e (g)为收获前 20 株果穗脱粒后籽粒质量; f (%)为收获前 20 株果穗脱粒后水分含量;0.86 为折算含 14 个水的系数。

$$\text{收获指数} : \varepsilon = \frac{Y}{y} \quad (6)$$

耗水量计算公式:

$$ET_a = \Delta W + P + I + U - R - D \quad (7)$$

式中,土壤蒸发量与植物蒸腾量之和作物蒸散量(ET_a ,mm);计算时段末于时段初土壤水分的变化(ΔW ,mm);有效降雨量(P ,mm);灌水量(I ,mm);地下水补给(U ,mm);地面径流损失量(R ,mm);土壤水分上行或下行(D ,mm)。

$$\text{水分利用效率计算公式: } WUE = \frac{Y}{ET} \quad (8)$$

1.5 数据处理

试验数据利用 Microsoft excel 2022 和 SPSS 27.0 进行处理及统计分析。用最小显著差异法(LSD)进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 滴灌梯度对玉米吐丝期净光合速率日变化的影响

从图2可以看出,不同滴灌梯度对玉米吐丝期穗位叶净光合速率到达峰值时间不同。总体呈现6:00—12:00升高,12:00后降低。滴灌梯度在早晨傍晚时对叶片的净光合速率日变化影响最小。滴灌梯度对玉米吐丝期在12:00的净光合速率大小顺序为 $W3 > W2 > W4 > W1 > W5$ 处理。W3处理的净光合速率为 $41.85 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,分别比W1、W2、W4、W5处理高19.40%、3.69%、4.52%、37.98%。由于不同滴灌梯度导致各处理达到峰值的时间也不同。W5处理在13:00达到峰值,W1、W2、W3、W4处理均在12:00达到峰值。在16:00之后净光合速率迅速下降,20:00时降为负值。

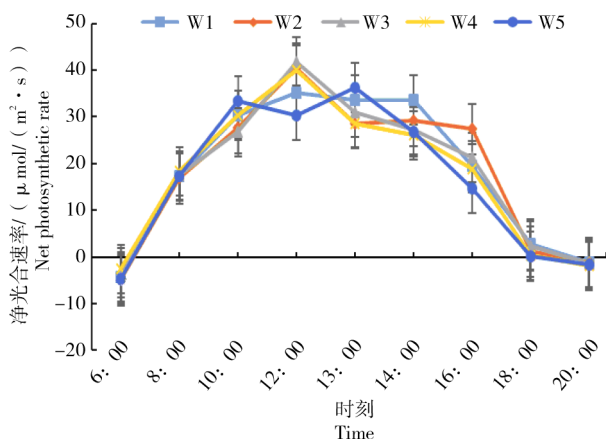


图2 不同滴灌梯度下玉米叶片净光合速率日变化
Fig.2 Diurnal variation of net photosynthetic rate in maize leaves under different drip irrigation gradients

2.2 滴灌梯度对玉米吐丝期气孔导度日变化的影响

从图3可以看出,不同滴灌梯度对玉米吐丝期气孔导度日变化的影响规律与净光合速率变化趋势相同。吐丝期的气孔导度呈先增加后降低的趋势,呈单峰变化。在6:00—12:00时,各处理的气孔导度呈直线上升,12:00时各处理均达到峰值。由大到小依次为 $W4 > W3 > W5 > W2 > W1$ 处理,W4处理分别比W1、W2、W3、W5处理高17.82%、7.56%、2.32%、6.65%。在12:00过后,气孔导度开始缓慢下降,14:00时W3处理最大,为 $284.95 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其次是W4处理,再次为W5处理,W1处理最小,为 $224.22 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。14:00之后,各处理的气孔导度快速下降,直至20:00达到最小值。

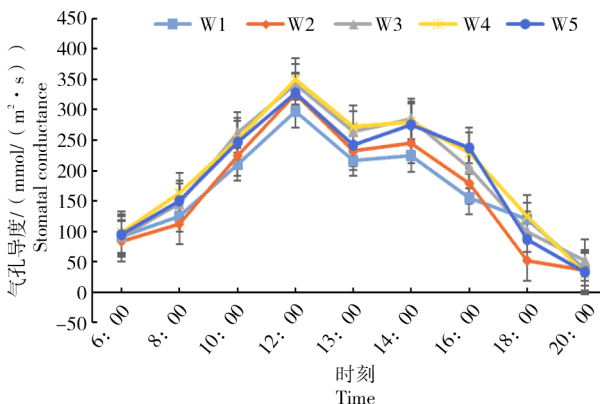
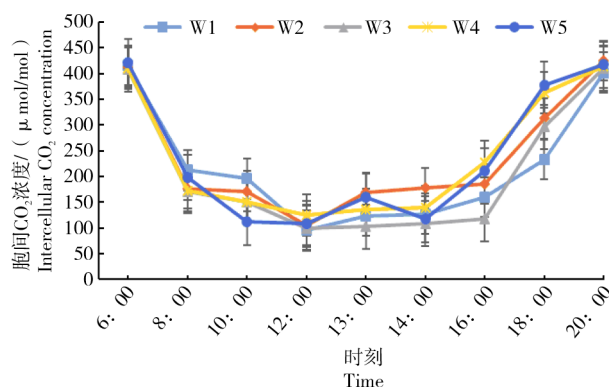


图3 不同滴灌梯度下玉米叶片气孔导度日变化

Fig.3 Diurnal variation of stomatal conductance in maize leaves under different drip irrigation gradients

2.3 滴灌梯度对玉米吐丝期胞间CO₂浓度日变化的影响

从图4可以看出,不同滴灌梯度对玉米吐丝期胞间CO₂浓度呈先降低后增加的“V”字形变化趋势。6:00—8:00下降速率最快,12:00胞间CO₂浓度达到最低。其中,W4处理的胞间CO₂浓度最高,为 $124.91 \mu\text{mol}/\text{mol}$,分别比W1、W2、W3、W5处理高30.84%、18.28%、25.60%、15.85%。各处理的胞间CO₂浓度在12:00时由高到低依次为 $W4 > W5 > W2 > W3 > W1$ 。各处理的胞间CO₂浓度在12:00—20:00呈上升趋势,其中16:00—18:00上升速率最快,在18:00之后趋于平缓。W4处理最高,分别比W1、W2、W3、W5处理高9.01%、0.13%、14.75%、0.73%。

图4 不同滴灌梯度下玉米叶片胞间CO₂浓度日变化Fig.4 Diurnal variation of intercellular CO₂ concentration in maize leaves under different drip irrigation gradients

2.4 滴灌梯度对玉米吐丝期蒸腾速率日变化的影响

从图5可以看出,不同滴灌梯度对玉米吐丝期叶片蒸腾速率日变化的影响呈单峰曲线。W5处理在10:00达到峰值,为7.26 mmol/(m²·s),分别比W1、W2、W3、W4处理高6.84%、67.37%、25.24%、49.49%。在12:00之前,各处理均呈增长趋势,在12:00时,W1、W2、W3、W4处理均达到峰值,分别为8.39、10.96、10.27、8.95 mmol/(m²·s)。在12:00各处理的蒸腾速率依次为W2>W3>W4>W1>W5。W2处理比其他处理分别高出30.48%、6.72%、22.39%、50.2%。12:00—13:00时,W5处理又呈现上升趋势,13:00蒸腾速率为8.47 mmol/(m²·s)。在13:00之后逐渐下降,直到20:00达到最小值。12:00—18:00期间,除了W5处理有上升,其余各处理均呈现下降趋势,直至20:00达到最小值。

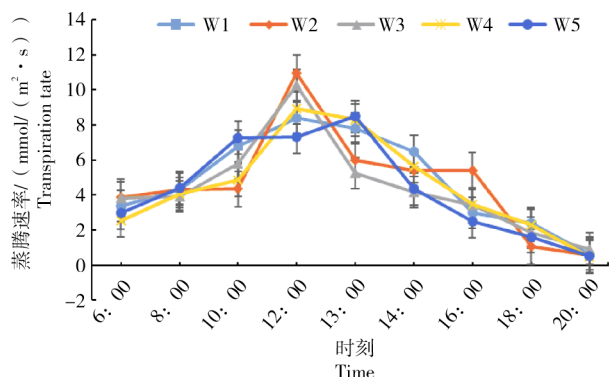


图5 不同滴灌梯度下玉米叶片蒸腾速率日变化

Fig.5 Diurnal variation of transpiration rate in maize leaves under different drip irrigation gradients

2.5 滴灌梯度对玉米吐丝期光响应曲线日变化的影响

由图6可知,不同滴灌梯度对玉米吐丝期光响应曲线日变化符合米氏响应规律。净光合速率随着光照强度增加而增加,之后又趋于平缓。在光照强度为0~800 μmol/(m²·s)时,各滴灌梯度的玉米吐丝期净光合速率呈直线增长趋势,在光照强度为800~1000 μmol/(m²·s)时,净光合速率缓慢增长,1000 μmol/(m²·s)之后基本保持不变。光照强度1200 μmol/(m²·s)时,净光合速率大小顺序为W4>W3>W5>W2>W1。

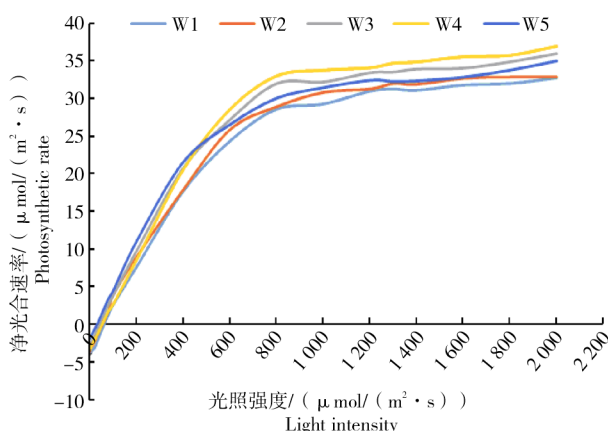


图6 不同滴灌梯度下玉米叶片光响应曲线日变化

Fig.6 Diurnal variation of light response curve in maize leaves under different drip irrigation gradients

从表2可以看出,各滴灌梯度对玉米吐丝期穗位叶片的光响应曲线拟合表现良好,R²均在0.99以上,在P<0.05水平下均有显著差异。由表2模拟出的最大净光合速率(P_{max})可得,W4处理拟合值最大,其值为40.093 μmol/(m²·s),分别比W1、W2、W3、W5处理的最大净光合速率提高了6.54%、6.51%、2.05%、5.76%。曲角(K)表现为W4处理的拟合值最大,其次为W2、W3处理,再次为W1处理,W5处理最小。表观量子效率(Q)可表现出玉米处于弱光时的利用效率。其从大到小的排序为W5>W3>W4>W2>W1。光强为0时的利用效率是指暗呼吸速率(R_d),W1处理最大,其值为4.437 μmol/(m²·s),其次为W4处理,最小为W5处理。各处理的光饱和点(LSP)的大小顺序为W4>W1>W2>W3>W5处理,表明,W4处理利用光强的能力最强。光补偿点(LCP)的大小顺序为W1>W4>W2>W3>W5处理。

表 2 不同滴灌梯度下玉米叶片光响应曲线模拟参数

Tab.2 Light response curve simulation parameters of maize leaves under different drip irrigation gradients

处理 Treatment	$P_{max}/$ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)	K	$Q/$ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)	$Rd/$ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)	$LSP/$ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)	$LCP/$ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)	R^2
W1	37.633	0.903	0.061	4.437	689.672 131 1	72.737 704 92	0.999
W2	37.642	0.906	0.062	3.265	659.790 322 6	52.661 290 32	0.999
W3	39.286	0.906	0.067	2.825	628.522 388 1	42.164 179 10	0.999
W4	40.093	0.950	0.063	3.414	690.587 301 6	54.190 476 19	0.999
W5	37.908	0.848	0.072	2.110	555.805 555 6	29.305 555 56	0.999

2.6 滴灌梯度对玉米干物质积累的影响

由表 3 可知,不同滴灌梯度下玉米吐丝期的株高、全株干质量、叶干质量、茎干质量、鞘干质量及苞叶干质量均有较大差异。各处理的全株干质量排序为 $W5>W4>W3>W2>W1$ 处理, $W5$ 处理

分别比 $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$ 、 $W4$ 处理高 39.8%、21.67%、16.85%、11.43%。综上所述, $W1$ 处理的表现最差,干物质积累最少。 $W4$ 、 $W5$ 处理与其余处理差异显著($P<0.05$),综合表现良好。

表 3 不同滴灌梯度对玉米吐丝期干物质积累的影响

Tab.3 Impact of different drip irrigation gradients on dry matter accumulation at the tasseling-silking stage of maize

处理 Treatment	株高/cm Plant height	全株干质量/ (kg/hm^2) Plant dry weight	叶干质量/ (kg/hm^2) Leaf dry weight	茎干质量/ (kg/hm^2) Stem dry weight	鞘干质量/ (kg/hm^2) Sheath dry weight	苞叶干质量/ (kg/hm^2) Bract dry weight	棒干质量/ (kg/hm^2) Cob
W1	283.40c	13 250.25c	2 225.25c	4 224.75c	1 475.25d	1 674.75c	3 650.25d
W2	296.80b	15 225.00b	2 574.75b	4 875.00b	1 650.00c	1 850.25c	4 275.00c
W3	299.00b	15 849.75b	2 675.25ab	4 650.00c	1 800.00ab	2 100.00b	4 624.50bc
W4	302.77b	16 625.25b	2 499.75b	5 349.75ab	1 725.00bc	2 124.75b	4 926.00b
W5	309.83a	18 525.00a	2 925.00a	5 724.75a	1 899.75a	2 349.75a	5 625.75a

注:不同小写字母表示各处理间在 0.05 水平下存在显著差异。下表同。

Note: The different lowercase letters indicated a significant difference among treatments at the 0.05 level. The same as below.

从表 4 可以看出,滴灌梯度对玉米产量和收获指数的影响存在较大差异,各处理对生物产量的大小顺序为 $W5>W4>W3>W2>W1$ 处理,各处理间均存在显著差异($P<0.05$)。分析滴灌梯度对经济产量的影响可看出,以 $W5$ 处理最大,为 17 829.49 kg/hm^2 ,分别比 $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$ 、 $W4$ 处理

高出 24.93%、17.92%、13.71%、1.01%。收获指数为 $W4$ 处理最大,其次为 $W1$ 、 $W2$ 处理,最小的为 $W5$ 处理。各处理的水分利用效率由高到低为 $W4$ 、 $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$ 、 $W5$ 处理, $W5$ 处理显著低于其他处理($P<0.05$)。

表 4 不同滴灌梯度对玉米产量、收获指数及水分利用效率(WUE)的影响

Tab.4 Impact of different drip irrigation gradients on maize yield, harvest index and water use efficiency(WUE)

处理 Treatment	经济产量/(kg/hm^2) Economic yield	生物产量/(kg/hm^2) Biological yield	收获指数 Harvest index	田间耗水量/mm Field water consumption	水分利用效率/($\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$) Water use efficiency
W1	14 271.97d	24 625.00d	0.58a	388.33e	36.76a
W2	15 120.37c	26 250.83cd	0.58a	429.24d	35.23b
W3	15 679.75b	28 451.67bc	0.55ab	445.65c	35.18b
W4	17 650.54a	30 124.17b	0.58a	474.10b	37.23a
W5	17 829.49a	34 342.50a	0.52b	580.55a	30.71c

3 结论与讨论

光合作用是作物高产的关键,想要提高作物产量就要最大限度的提高光合效率^[19]。蔡倩等^[20]研究结果表明,水分供应与植物生长发育状况以及粮食产量均密切相关。重度水分胁迫使玉米产量下降1/2,且耗水量有所降低。水分是植物生理代谢活动的重要底物。水分亏缺直接造成作物根、茎、叶、籽粒的生长缓慢甚至减产。土壤水分供应不足会降低玉米地上生物量^[21]。水分胁迫会抑制茎、叶的生长^[22]。时晴晴等^[23]研究玉米器官生长相关性对水分胁迫的响应,结果表明,玉米最易在吐丝期和灌浆期发生水分缺失,这2个时期需水量最多,直接影响玉米的产量,因此,要保证此时期的水分供应。本研究表明,在北方农牧交错区,不同滴灌梯度下玉米吐丝期的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均呈单峰曲线变化^[24],达到峰值的时间并不一致。随着温度和光照强度的逐渐升高光合速率也随之升高^[25],净光合速率在12:00时达到峰值,且W2、W3、W4处理的光合速率都较高,而灌水最少的W1处理与灌水最多的W5处理光合速率较低,可能是出现了“光合午休”现象。这一结论与张德健等^[26]、白岚方等^[27]保持一致。各处理的净光合速率随着水分的增加也逐渐增加,午后又逐渐下降。可能是因为午后的光照条件逐渐变差,出现了单峰曲线变化。不同滴灌量对玉米吐丝期的胞间CO₂浓度的影响均呈先下降后上升的“V”字形变化趋势,在12:00达到最低值。不同灌溉量对玉米蒸腾速率的影响同样呈现单峰曲线,除W5处理外,其余处理在12:00达到峰值,W5处理在10:00达到峰值。胞间CO₂浓度表现为先降低再升高。

光能在植物的生长发育过程中起着重要作用^[28]。玉米植株的光响应曲线可以体现出生长发育进程中对不同光照强度的利用规律^[29]。因此,光响应曲线被广泛用于研究植物对光的感知和反应机制^[30]。通过对曲角、量子效率、暗呼吸速率、光饱和点、光补偿点进一步深入分析,植物的光响应曲线分为2种情况,一种为随着光合有效辐射的增强光合速率随之增强,达到光饱和点之后趋于平稳。另一种则显示为达到饱和点之后光合速率反而下降,这种现象为光抑制现象^[31-32]。本研究表明,不同灌水量下各处理的最大净光合速率从大到小排

序为W4>W3>W5>W2>W1处理。由此可看出W4处理的光响应曲线拟合最好。同时也看出在缺水情况下,玉米吐丝期的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率显著下降。土壤相对含水量低,各光合参数达到最小值^[33]。

玉米产量的高低是由多种因素共同作用的,水分是重要因素之一。作物的干物质主要来源于光合作用,光合能力强弱直接影响产量多少。叶片是玉米进行光合作用的主要器官,因此,获得高产或者较高的光合同化物,需要增加叶片的面积或延长叶片功能期。籽粒产量与水分有着直接的关系,过多或者过少的灌水均不利于玉米的产量提升^[34],过多易造成养分流失,过少无法满足生长要求。适宜的灌水量能增加单株玉米干物质的积累量以及对营养元素的吸收^[35]。在一定临界值下,玉米产量会随着灌水量的增加而增加,但大量用水不利于发展节水农业。玉米需水关键期为拔节期、吐丝期和灌浆期,特别是需水量最大的吐丝期,要结合自然降水对灌溉水量和频次进行控制,实现高效节水且提升节水技术水平。本研究表明,W4处理在满足玉米产量的情况下,收获指数及水分利用效率均最高。验证了在适量供水条件下可以实现作物高产,过量灌溉会导致作物减产或保持稳定。这与杨永辉等^[36]的研究结果保持一致。

北方农牧交错区不同滴灌梯度下玉米吐丝期的光合速率、气孔导度、蒸腾速率等均呈单峰曲线变化,达到峰值的时间却不尽相同。胞间CO₂浓度变化趋势为先降低再升高。光响应曲线综合表现较好。综合考虑5个处理的产量和水分高效利用发展节水农业,以W4处理更优。综上所述,北方农牧交错区降雨量在360~400 m³/hm²时,春玉米选用较适宜的滴灌量为1 275 m³/hm²。在未来的生产实践中,可以根据当地实际情况选择适合的滴灌梯度,实现经济效益和生态效益的提升。

参考文献:

- [1] 谢轶. 浅谈我国水资源分布和生态红线[J]. 现代农业研究, 2020, 26(3): 143-144.
XIE Y. On the distribution of water resources and ecological red line in China[J]. Modern Agriculture Research, 2020, 26(3): 143-144.
- [2] 肖雨霄. 北方农牧交错带典型饲草作物耗水规律及灌溉方案

- 优化研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2023.
- XIAO Y X. Study on Water consumption rule of typical forage crops and optimization of irrigation scheme in northern agro-pastoral ecotone[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2023.
- [3] 高元杰,苗昌盛. 农业水资源现状与节约利用[J]. 河北农机, 2023(1):118-120.
- GAO Y J, MIAO C S. Current situation and economical utilization of agricultural water resources[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2023(1):118-120.
- [4] 陈永喆,崔艳红,张才金,等. 变化环境下黄河流域内蒙古段植被与水文要素的时空协同演变[J]. 水资源保护, 2024, 40(2):141-149.
- CHEN Y Z, CUI Y H, ZHANG C J, et al. Spatio-temporal co-evolution of vegetation and hydrological elements under a changing environment in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 141-149.
- [5] 张晓红,侯利,赵塞洲,等. 河套灌区多水源滴灌与引黄漫灌生产成本及收益对比研究[J]. 内蒙古水利, 2020(3):11-13.
- ZHANG X H, HOU L, ZHAO S Z, et al. Comparative study on production costs and benefits of multi-water source drip irrigation and flood irrigation with Yellow River diversion in Hetao irrigation District[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2020(3):11-13.
- [6] 徐蕊,马国飞,尚艳,等. 小喇叭口至灌浆期水分胁迫对玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2022(10):44-49.
- XU R, MA G F, SHANG Y, et al. Effects of water stress on yield structure and water use efficiency of corn from small bell mouth stage to grain filling stage[J]. Water Saving Irrigation, 2022(10):44-49.
- [7] 艾尼瓦尔·阿不都拉,刘翔宇,徐彦军,等. 玉米种植密度对产量的影响试验分析[J]. 农业装备技术, 2023, 49(3):31-33, 41.
- ENIVAR ABDURA, LIU X Y, XU Y J, et al. Experimental analysis of effect of planting density on yield of maize[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2023, 49(3):31-33, 41.
- [8] 谢岷,高聚林,于晓芳,等. 基于GIS技术和MaxEnt模型的内蒙古玉米种植气候适宜性评价[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2019, 40(6):11-17.
- XIE M, GAO J L, YU X F, et al. Study on climatic suitability evaluation of maize planting in Inner Mongolia based on GIS technology and maxent model[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 11-17.
- [9] 周曙东,周文魁,林光华,等. 未来气候变化对我国粮食安全的影响[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2013, 13(1): 56-65.
- ZHOU S D, ZHOU W K, LIN G H, et al. The impact of future climate change on China's food security[J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition), 2013, 13(1): 56-65.
- [10] 冀晓娜. 干旱胁迫对土壤水分和玉米产量结构的影响分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2022(23):103-105.
- JI X N. Effects of drought stress on soil moisture and maize yield structure[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2022(23):103-105.
- [11] 袁超,张芮,张梅花,等. 不同水肥供应对石羊河流域玉米生长动态及水分利用效率的影响[J]. 水利技术监督, 2023, 31(8):190-197.
- YUAN C, ZHANG R, ZHANG M H, et al. Effect of different water and fertilizer supply on maize growth dynamics and water use efficiency in Shiyanghe river basin[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2023, 31(8): 190-197.
- [12] 张向前,白岚方,路战远,等. 种植密度对春玉米灌浆期光合特性日变化和光响应曲线及产量的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(4):96-103.
- ZHANG X Q, BAI L F, LU Z Y, et al. Light-response curves and yield of maize in grain-filling period[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(4):96-103.
- [13] 高迎娟,马吉晖,江虹,等. 通化市玉米需水量的计算及分析[J]. 吉林气象, 2003, 10(3):31-33.
- GAO Y J, MA J H, JIANG H, et al. Calculation and analysis of corn water requirement in Tonghua City[J]. Meteorological Disaster Prevention, 2003, 10(3):31-33.
- [14] 康文钦,石晓华,段海文,等. 阴山北麓旱作区主要作物需水量及需水规律分析[J]. 天津农业科学, 2023, 29(S1):13-16.
- KANG W Q, SHI X H, DUAN H W, et al. Analysis of water requirement and water requirement law of main crops in dry-land area at the northern foot of Yinshan Mountain[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2023, 29(S1):13-16.
- [15] 张明达,张国强,王克如,等. 种植密度和灌溉量对西辽河平原春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(1):116-125.
- ZHANG M D, ZHANG G Q, WANG K R, et al. Effects of planting density and irrigation amount on yield and water use efficiency of spring maize in the West Liaoh Plain[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(1):116-125.
- [16] 梅园雪,冯玉涛,冯天骄,等. 玉米浅埋滴灌节水种植模式产量与效益分析[J]. 玉米科学, 2018, 26(1):98-102.
- MEI Y X, FENG Y T, FENG T J, et al. Brief discussion on the efficient water-saving planting mode of shallow buried drip irrigation[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(1):98-102.
- [17] MARSHALL B, BISCOE P V. A model for C3 leaves describing the dependence of net photosynthesis on irradiance[J]. Journal of Experimental Botany, 1980, 31(1):29-39.
- [18] QIU J. China faces up to groundwater crisis[J]. Nature, 2010, 466:308.
- [19] 吴霞玉,李盼,韦金贵,等. 减量灌水及有机无机肥配施对西北灌区玉米光合生理、籽粒产量及品质的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(4):1065-1079.
- WU X Y, LI P, WEI J G, et al. Effect of reduced irrigation and combined application of organic and chemical fertilizers on photosynthetic physiology, grain yield and quality of maize in northwestern irrigation areas[J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(4):1065-1079.
- [20] 蔡倩,孙占祥,郑家明,等. 水分胁迫对玉米根系形态、产量及水分利用效率的影响[C]//中国农学会耕作制度分会2018年度学术年会论文摘要集,哈尔滨:中国农学会,2018.
- CAI Q, SUN Z X, ZHENG J M, et al. Effects of water stress on root morphology, yield and water use efficiency of maize

- [C]//2018 annual conference of chinese society of agricultural systems, Harbin: China association of agricultural science societies, 2018.
- [21] 郑云普, 刘媛媛, 殷嘉伟, 等. 水分和 CO₂ 对玉米光合性能及水分利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 71-81. ZHENG Y P, LIU Y Y, YIN J W, et al. Effects of watering and CO₂ on leaf photosynthesis and water use efficiency of maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(12): 71-81.
- [22] 刘溢健. 小麦灌浆期不同程度干旱胁迫对同化物转运积累及籽粒灌浆的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. LIU Y J. Effects of drought stress at different degrees on assimilate transport and accumulation and grain filling in wheat filling stage[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- [23] 时晴晴, 李炎, 王仰仁. 玉米器官生长相关性对水分胁迫的响应[J]. 节水灌溉, 2023(10): 11-17. SHI Q Q, LI Y, WANG Y R. Responses of maize organ growth correlation to water stress[J]. Water Saving Irrigation, 2023(10): 11-17.
- [24] 孟天天, 杜香玉, 张向前, 等. 灌水量对玉米大喇叭口期光合日变化及干物质积累的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(S2): 9-16. MENG T T, DU X Y, ZHANG X Q, et al. Effects of irrigation amount on diurnal variation of photosynthesis and dry matter accumulation of maize in trumpet stage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(S2): 9-16.
- [25] 裴磊, 王振华, 郑旭荣, 等. 氮肥对北疆滴灌复播青贮玉米光合特性及养分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 176-182. PEI L, WANG Z H, ZHENG X R, et al. Effects of nitrogen fertilizer on the photosynthetic characteristics and nutrient utilization of drip irrigated silage maize by sequential cropping in north Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(2): 176-182.
- [26] 张德健, 路战远, 张向前, 等. 不同耕作条件下玉米光合特性的差异[J]. 华北农学报, 2014, 29(2): 161-164. ZHANG D J, LU Z Y, ZHANG X Q, et al. Effects of conservation tillage technology systems on diurnal variations of photosynthetic characteristics of maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(2): 161-164.
- [27] 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. BAI L F, LU Z Y, ZHANG X Q, et al. Diurnal variation of photosynthetic characteristics of panicle position leaf during filling period and difference of silage yield of different maize varieties[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(4): 29-37.
- [28] 罗文秀, 米琪, 陆尤, 等. 温度升高对灯盏花光合生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2023(22): 108-115. LUO W X, MI Q, LU Y, et al. Effects of temperature rise on photosynthetic physiological characteristics of *Erigeron breviscapus*[J]. Northern Horticulture, 2023(22): 108-115.
- [29] 贺正, 刘志, 苗芳芳, 等. 宁夏引黄灌区滴灌玉米4种光响应曲线模型比较[J]. 玉米科学, 2020, 28(1): 124-131. HE Z, LIU Z, MIAO F F, et al. Comparison of four light response curve models of drip irrigation maize in Ningxia Yellow River irrigation district[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(1): 124-131.
- [30] 李义博, 宋贺, 周莉, 等. C₄植物玉米的光合-光响应曲线模拟研究[J]. 植物生态学报, 2017, 41(12): 1289-1300. LI Y B, SONG H, ZHOU L, et al. Modeling study on photosynthetic-light response curves of a C₄ plant, maize[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(12): 1289-1300.
- [31] 刘东娜, 李兰英, 龚雪蛟, 等. 茶树光响应曲线模型的筛选与光响应特征比较[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(23): 146-151. LIU D N, LI L Y, GONG X J, et al. Screening of photosynthetic models and comparison of light response characteristics in tea plant[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(23): 146-151.
- [32] 刘兴, 赵丹, 杨晓, 等. 遮光对糠稷幼苗光合特性的研究[J]. 林业与生态科学, 2020, 35(1): 86-92. LIU X, ZHAO D, YANG X, et al. Effects of shading on photosynthetic physiology of *Tilia mandshurica* seedlings[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2020, 35(1): 86-92.
- [33] 胡啸, 吕晓东, 赵福年, 等. 土壤干旱过程中玉米叶片光响应特征及其模拟[J/OL]. 甘肃农业大学学报, 1-10[2024-01-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.S.20231206.0907.002.html>. HU X, LÜ X D, ZHAO F N, et al. Characteristics and simulation of light response of maize leaves during soil drought[J/OL]. Journal of Gansu Agricultural University, 1-10[2024-01-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.S.20231206.0907.002.html>.
- [34] 黄悦, 李思恩, 胡丹, 等. 基于Meta-Analysis方法分析滴灌对玉米水分利用效率及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 96-105. HUANG Y, LI S E, HU D, et al. Effects of drip irrigation on water use efficiency and yield of maize based on Meta-Analysis[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 96-105.
- [35] 师晶晶, 兰慧青, 张向前, 等. 滴灌量对耐密宜机收玉米干物质积累分配及产量形成的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 1-8. SHI J J, LAN H Q, ZHANG X Q, et al. Influence of drip irrigation on dry matter distribution and yield formation of the grains of densely planted maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 1-8.
- [36] 杨永辉, 武继承, 高翠民, 等. 滴灌条件下灌水量对冬小麦、夏玉米周年水分利用的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2024, 41(2): 11-17. YANG Y H, WU J C, GAO C M, et al. Impact of different irrigation amounts on annual water utilization of winter wheat and summer maize under drip irrigation[J]. Barley and Cereal Sciences, 2024, 41(2): 11-17.