

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

孟天天^{1,4}, 杜香玉², 张向前^{3,4*}, 陈丽荣¹, 路战远^{2,3,4,5}, 兰慧青⁵, 刘雅杰⁵, 武迪⁵
(1.河北农业大学, 河北 保定 071000; 2.蒙草生态环境(集团)股份有限公司, 呼和浩特 010070;
3.内蒙古自治区农牧业科学院, 呼和浩特 010031; 4.内蒙古自治区退化农田生态修复与污染防治
重点实验室, 呼和浩特 010031; 5.内蒙古大学, 呼和浩特 010020)

摘要:【目的】揭示灌水量对春玉米大喇叭口期光合日变化规律, 进一步明确玉米干物质积累的差异性。【方法】以春玉米品种广德 5 为试验材料, 在 2018 年灌水量定位试验基础上, 2019 年设置了 DGT1 (315 m³/hm²)、DGT2 (645 m³/hm²)、DGT3 (945 m³/hm²)、DGT4 (1 275 m³/hm²)、DGT5 (1 605 m³/hm²) 5 个灌水量以及在 2020 年增设不灌水雨养对照 (DGT0), 分析灌水量对春玉米大喇叭口期最大展开叶叶片光合特性日变化、光响应曲线以及干物质积累的影响。【结果】随着灌水量的增加, 各处理光合速率 (P_n) 日变化、气孔导度 (G_s) 日变化以及蒸腾速率 (T_r) 日变化均呈双峰曲线变化趋势, 存在午休现象, 达到双峰时间相同, 峰值大小存在一定差异; 而各灌水量处理的胞间 CO₂ 摩尔分数 (C_i) 日变化则呈先降低后升高的“V”字形曲线变化趋势。不同灌水量处理的光响应曲线拟合较好, 2020 年和 2019 年的最大净光合速率均以 DGT3 处理最大, 2019 年 DGT3 处理分别比 DGT1、DGT2、DGT4、DGT5 处理模拟出的最大净光合速率高出 8.71%、3.68%、13.75%、13.59%。2020 年 DGT3 处理分别比 DGT0、DGT1、DGT2、DGT4、DGT5 处理模拟出的最大净光合速率高出 25.6%、22.0%、8.2%、17.0%、22.2%。2019 年单株干物质质量变化 DGT3 处理比 DGT1、DGT2、DGT4、DGT5 处理分别高出 14.1%、17.8%、28.9%、12.1%。2019、2020 年在 DGT3 处理和 DGT1 处理均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。【结论】综上所述可知, 玉米较适宜滴灌量为 945 m³/hm²。

关键词: 春玉米; 灌水量; 光合日变化; 光响应曲线; 干物质

中图分类号: S521

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022596

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(Supp.2): 9-16.

MENG Tiantian, DU Xiangyu, ZHANG Xiangqian, et al. Effect of Irrigation Amount on the Diurnal Changes of Photosynthesis and Dry Matter Accumulation of Maize in the Horn Mouth Stage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Supp.2): 9-16.

0 引言

【研究意义】内蒙古地区水资源匮乏, 而且时空分布不均匀, 这些因素严重制约了该区域农业的生产^[1]。玉米已成为内蒙古自治区最主要的农作物^[2]。所以提高玉米产量对我国的粮食需求具有重要意义^[3]。

【研究进展】作物的生育时期及干物质积累和后期产量的形成都受到水分的影响^[4]。而干旱条件下光

合性能的降低是限制植株产量的主要生理因素之一^[5], 作物有机物积累主要来源于光合作用, 光合作用作为作物最重要的生理过程之一, 其光合作用的强弱直接影响产量的高低^[6]。产量与净光合速率、蒸腾速率等气体交换参数均呈正相关关系^[7-8]。关于水分胁迫下玉米光合日变化影响的研究, 主要集中在 WUE 、光合作用及其他影响因子等方面^[9]。水分亏缺会因为生育时期的不同而对玉米的干物质积累以及产量的形成造成一定影响^[10], 玉米生长前期水分亏缺对产量的影响比后期对产量的影响较大, 以大喇叭口期为分界线, 营养生长期轻度水分胁迫对玉米影响较小, 对干旱具有一定的适应性^[11-12]。大喇叭口期时植物体大约已建成 60%, 这时如果肥水充足有利于玉米穗粒数的增加, 是玉米水肥供应的关键时期, 也为后期产量的提高打下基础^[13-15], 水分对该时期的影响较大,

收稿日期: 2022-10-23

基金项目: 内蒙古自治区“科技兴蒙”重点专项-创建鄂尔多斯国家可持续发展议程创新示范区项目; 内蒙古自治区人才引进项目; 内蒙古自治区草原英才项目

作者简介: 孟天天 (1994-), 女, 内蒙古赤峰人。硕士, 主要从事土壤耕作与农业生态研究。E-mail: 15754882732@163.com

通信作者: 张向前 (1984-), 男, 内蒙古赤峰人。研究员, 博士, 主要从事土壤耕作与农业生态等方面的研究。
E-mail: zhangxiangqian_2008@126.com

是玉米生长代谢的关键时期^[16], 该时期干物质积累对后期产量及产量构成因素具有重要意义^[17]。所以研究大喇叭口期玉米在不同水分处理下的光合特性以及干物质积累规律, 为后期干物质积累及产量形成打下基础。

滴灌是节水灌溉的主要技术措施之一, 浅埋滴灌下水分利用效率显著增加^[18]。【切入点】关于不同滴灌量处理下, 玉米光合日变化和光响应曲线研究较少, 特别是对于玉米营养与生殖并进阶段的大喇叭口期光合性能变化特征的研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】因此, 研究不同灌水量条件下大喇叭口期光合特征及干物质积累规律, 明确各灌水量对大喇叭口期光合特性和干物质积累影响的差异性, 对玉米适宜灌溉量的选择以及节水高效栽培具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2019—2020 年在内蒙古自治区农牧业科学院试验基地进行, 属于中温带高原大陆性季风气候。2019 年降水量 406.1 mm, 年平均气温 7.3 °C, 该地 2019 年 5—10 月最高温度为 32.7 °C, 最低温度为 -4.8 °C, 日照时间 1 461.9 h; 2020 年降水量 367.2 mm, 年平均气温 7.1 °C, 该地 2020 年 5—10 月最高温度为 35.3 °C, 最低温度为 -4.5 °C, 日照时间 1 479.1 h, 全年降水量详见图 1。前茬作物为玉米, 试验土壤类型为壤土, pH 值为 7.89, 速效磷质量分数为 28.70 mg/kg, 有机质质量分数为 17.68 g/kg, 碱解氮质量分数为 19.25 mg/kg, 速效钾质量分数为 53.58 mg/kg, 全磷质量分数为 0.87 g/kg。

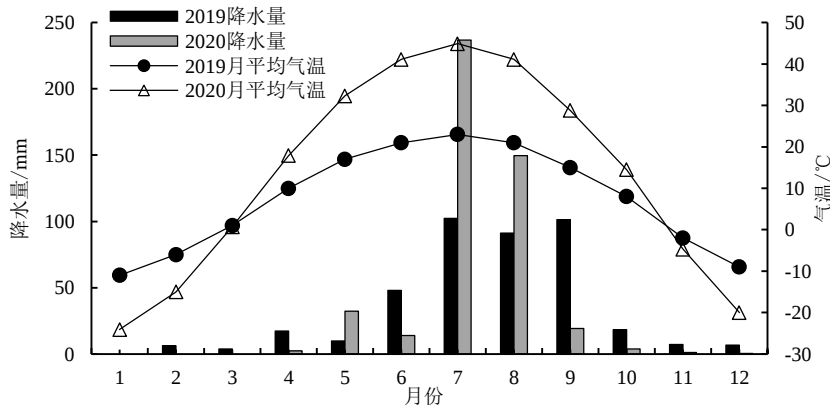


图 1 2019—2020 年试验区月降水量及月平均气温

Fig.1 Monthly precipitation and monthly average temperature of morrow plots from 2019 to 2020

1.2 供试材料

春玉米供试品种为吉林广德农业科技有限公司生产的“广德 5”。

1.3 试验设计

采取随机区组设置, 2019 年全生育期灌水量设置 5 个水平, 分别为 DGT1 (315 m³/hm²)、DGT2 (645 m³/hm²)、DGT3 (945 m³/hm²)、DGT4 (1 275 m³/hm²)、DGT5 (1 605 m³/hm²), 每个处理重复 3 次, 共 15 个小区, 小区面积为 28 m²。2020 年设 6 个灌水量, 分别为不滴灌雨养处理 (DGT0)、DGT1 (315 m³/hm²)、DGT2 (645 m³/hm²)、DGT3 (945 m³/hm²)、DGT4 (1 275 m³/hm²)、DGT5 (1 605 m³/hm²)。每个处理重复 3 次, 共 18 个小区, 小区面积为 28 m²。保苗密度为 75 000 株/hm², 60 cm 等行距种植, 区组间距 1 m, 株距 22.2 cm。播种日期分别为: 2019 年 4 月 23 日和 2020 年 4 月 25 日, 各滴灌处理均在每年 6 月 25 日进行灌水, 2019 年在大喇叭口期之前 DGT1、DGT2、DGT3、DGT4、DGT5 处理下分别灌水 105、215、315、425、535 m³/hm²。2020 年在

喇叭口期之前 DGT1、DGT2、DGT3、DGT4、DGT5 处理下分别灌水 105、215、315、425、535 m³/hm²。各处理其他田间管理方式均相同。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 大喇叭口期光合日变化

分别于 2019 年 7 月 11 日和 2020 年 7 月 10 日晴朗天气利用 LI-6800 便携式光合系统分析仪 (Licor, USA) 测定, 分别于 06:00、08:00、10:00、12:00、13:00、14:00、16:00、18:00 时, 选取 3 株长势相当的植株分别测定不同灌水量处理下大喇叭口期玉米叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 摩尔分数等指标。每株均测定最大展开叶, 重复 3 次, 取平均值。防止光照强度随时间变化, 在开始测定时间感应并记录该测定时间段的光照强度, 光源光照强度设定为该测定时段记录的光强。

1.4.2 大喇叭口期光响应曲线

分别于 2019 年 7 月 11—12 日和 2020 年 7 月 9—11 日使用 LI-6800 便携式光合系统分析仪 (Licor, USA) 测定光响应曲线, 选取长势均匀的植株测定最

大展开叶片的光响应曲线, 重复 3 次, 光强梯度设定为 0、200、400、600、800、1 000、1 200、1 300、1 400、1 600、1 800、2 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$, 每个光强下的适应时间大约为 2 min。

1.4.3 大喇叭口期植株干物质

分别于 2019 年 7 月 7 日和 2020 年 7 月 8 日每个处理选取 3 株长势均匀植株, 取地上部测其株高, 然后将植株的茎、叶、鞘经 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 0.5 h, 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量, 然后测各部分干质量。

1.4.4 模拟方程

利用非直角双曲线 (Non-rectangular hyperbola equation) 模型对穗位叶片的净光合速率 (P_n) 和光合有效辐射 (PAR) 之间的关系进行分析^[19-20], 其模拟公式为:

$$P_n = \{Q \times PAR + P_{\max} - \text{SQRT} [(Q \times PAR + P_{\max}) \times (Q \times PAR + P_{\max}) - 4Q \times PAR \times K \times P_{\max}] \} \times 2K - R_d, \quad (1)$$

式中: $P_{\max}$ 表示最大净光合速率; Q 表示表观量子效率; R_d 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:

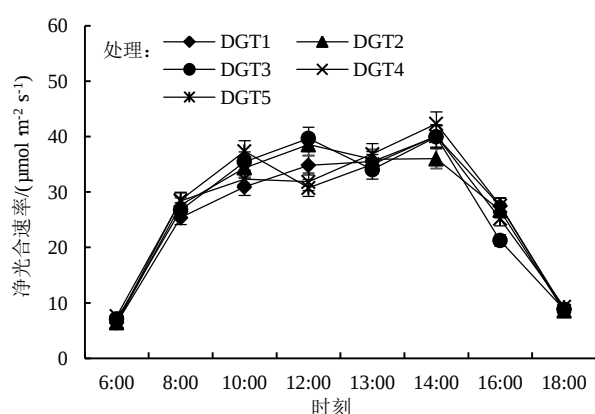
$$LSP = (P_{\max} + R_d) / Q. \quad (2)$$

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

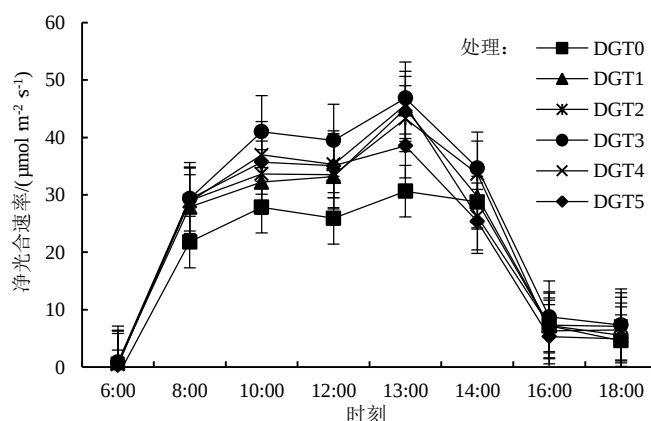
$$LCP = R_d / Q, \quad (3)$$

1.5 数据处理

利用井冈山大学叶子飘教授光合计算 4.1.1、SPSS 24.0、Origin9 进行处理统计分析和作图。



(a) 2019 年



(b) 2020 年

图 2 2019、2020 年灌水量对玉米大喇叭口期最大展开叶净光合速率日变化的影响

Fig.2 Effect of irrigation amount on the diurnal changes of net photosynthetic rate of

Maize's maximum unfolded leaf at the flare stage in 2019 and 2020

2.2 灌水量对大喇叭口期气孔导度日变化的影响

从图 3 可知, 2 a 试验中不同灌水量对春玉米品种广德 5 大喇叭口期最大展开叶气孔导度日变化的影响与净光合速率日变化趋势相同, 均为双峰曲线变化。2019 年和 2020 年各处理气孔导度均在 10:00 达

2 结果与分析

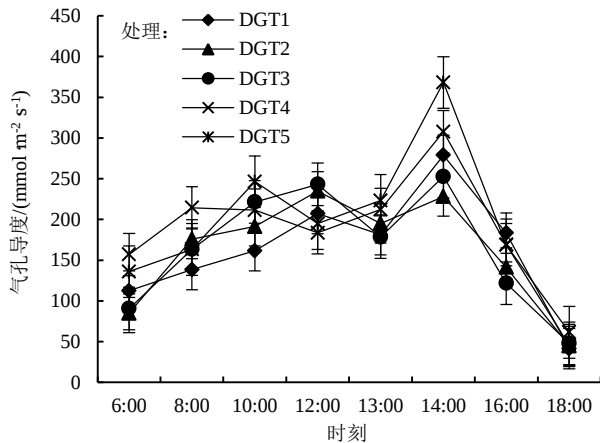
2.1 灌水量对大喇叭口期光合速率日变化的影响

由图 2 可知, 2019、2020 年不同灌水量下净光合速率变化趋势相同, 均为双峰型曲线变化, 但是峰值大小存在一定的差异。2019 年不同灌水量大喇叭口期最大展开叶净光合速率 (P_n) 到达双峰值时间不相同; 2020 年不同处理下叶片光合速率 (P_n) 达到双峰值时间相同。2 a 试验表明, 灌水量在 6:00、16:00、18:00 对叶片净光合速率的影响较小, 不同灌水量下均表现为: 06:00—08:00 净光合速率增长较快, 而在 08:00—10:00 增长缓慢。在不同灌水量下的净光合速率大多于 10:00 达到第 1 次峰值, 2019 年于 14:00 达到第 2 次峰值, 2020 年于 13:00 达到第 2 次峰值。2019、2020 年各处理均为第 1 个峰值的净光合速率低于第 2 个峰值, 2019 年的 DGT1、DGT2、DGT3 处理和 2020 年的 DGT5 处理除外。2019 年在 10:00 的净光合速率大小顺序为 DGT5 处理最大, DGT3 处理次之, DGT4 处理最低。在 14:00 净光合速率大小顺序为 DGT4 处理最高, DGT5 处理次之, DGT2 处理最低。2020 年到达第 1 峰值的时间是 10:00, 到达第 2 个峰值的时间是 13:00, 2 次峰值均在 DGT3 处理最大, 第 2 个峰值时 DGT1、DGT2、DGT3、DGT4、DGT5 处理的净光合速率比 DGT0 处理分别高出 46.9%、41.3%、53.0%、49.2%、25.8%; 故 DGT3 处理的平均净光合速率日变化最大, DGT4 处理次之, DGT0 处理最低。

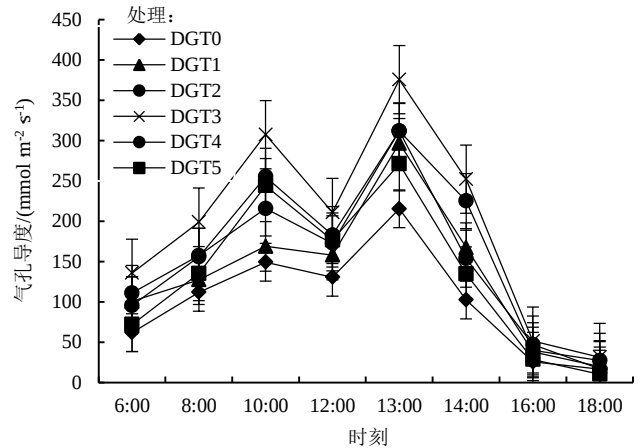
到第 1 个峰值, 分别为 368.103、307.32 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 。2019 年在 14:00 达到第 2 个峰值, DGT5 处理较其他各处理气孔导度 (G_s) 分别高出 32.02%、61.42%、45.75%和 19.67%。2020 年在 13:00 达到第 2 个峰值, DGT3 处理最大, 分别比 DGT0、DGT1、DGT2、DGT4、

DGT5 处理高出 74.41%、26.56%、20.46%、20.48%、38.57%。2020 年,随着灌水量的增加,气孔导度呈

先增加后降低趋势,DGT0 处理最小,DGT2 处理次之,DGT3 处理最大。



(a) 2019 年



(b) 2020 年

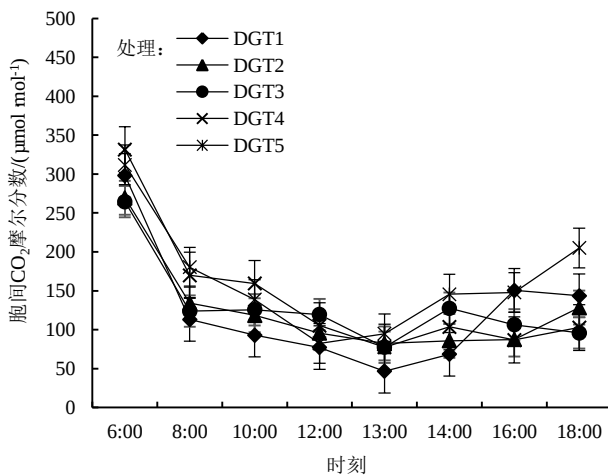
图 3 2019、2020 年灌水量对玉米大喇叭口期最大展开叶气孔导度日变化的影响

Fig.3 Effects of irrigation amount on the diurnal variation of stomatal conductance of the maximum expanded leaf in maize flare stage in 2019 and 2020

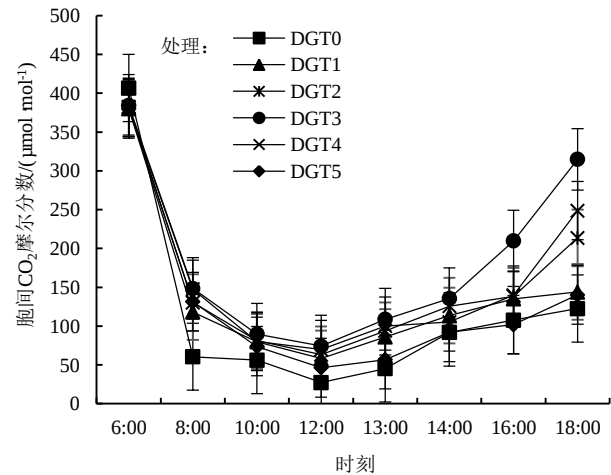
2.3 灌水量对大喇叭口期胞间 CO_2 摩尔分数日变化的影响

由图 4 可知,2019、2020 年不同灌水量下玉米在大喇叭口期胞间 CO_2 摩尔分数的变化整体趋势相同,呈先降低后增加的趋势。2019 年最低值集中在 13:00,2020 年最低值集中在 12:00。2019 年 DGT5 处理的胞间 CO_2 摩尔分数在 13:00 最高,为 223.27

$\mu\text{mol/mol}$, 分别比 DGT1、DGT2、DGT3、DGT4 处理高 102.83%、15.2%、22.4%、22.3%。综合比较 2020 年不同灌水量下的胞间 CO_2 摩尔分数平均日变化可以看出,DGT3 处理下的平均日胞间 CO_2 摩尔分数最大,为 1 465.57 $\mu\text{mol/mol}$,分别比 DGT0、DGT1、DGT2、DGT4、DGT5 处理提高了 37.46%、23.95%、16.16%、13.15%、30.23%。



(a) 2019 年



(b) 2020 年

图 4 2019、2020 年灌水量对玉米大喇叭口期最大展开叶胞间 CO_2 摩尔分数日变化的影响

Fig.4 Effects of irrigation amount on the diurnal changes of CO_2 concentration in the maximum spreading leaf of maize at the Flare Stage in 2019 and 2020

2.4 灌水量对大喇叭口期蒸腾速率日变化的影响

由图 5 可知,不同灌水量对玉米大喇叭口期叶片蒸腾速率日变化的影响与净光合速率的变化趋势均为双峰曲线。2019 年达到第 1 个峰值是 10:00,DGT5 处理最大为 5.04 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,达到第 2 个峰值为 14:00,也是 DGT5 处理,峰值为 7.53 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

整体表现为 DGT5 处理>DGT4 处理>DGT3 处理>DGT1 处理>DGT2 处理。2020 年各处理叶片蒸腾速率达到峰值时间分别在 10:00 和 13:00,且 13:00 各处理蒸腾速率高于 10:00。比较各时间点不同灌水量处理下叶片蒸腾速率,DGT0 处理对叶片蒸腾速率的影响最小,DGT1 处理次之,DGT3 处理对叶片蒸腾

速率的影响最大。10:00 各处理叶片蒸腾速率表现为 DGT3 处理最高, DGT4 处理次之, DGT0 处理最小。

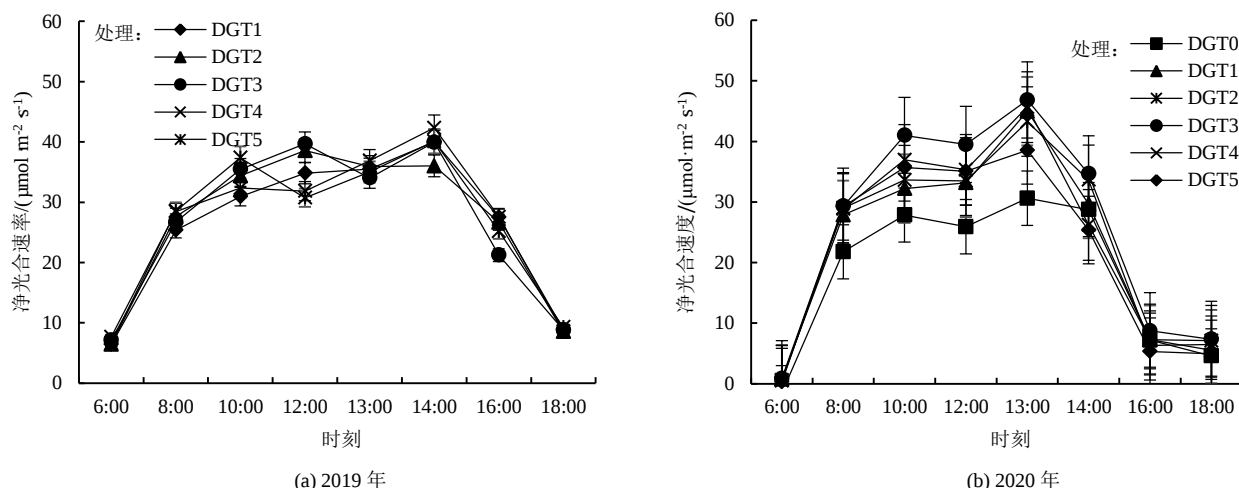


图5 2019、2020 年灌水量对玉米大喇叭口期最大展开叶蒸腾速率日变化的影响

Fig.5 Effects of irrigation amount on the diurnal variation of transpiration rate of the maximum expanded leaf of maize in the flare stage in 2019 and 2020

2.5 灌水量对大喇叭口期光响应曲线的影响

由图 6 可知,不同灌水量对春玉米品种广德 5 大喇叭口期最大展开叶叶片净光合速率与光合有效辐射的响应均符合米氏响应规律。2 a 净光合速率变化趋势相同,光照强度为 0~1 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,净光

合速率随着光照强度的增加而增加并且在 0~1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时增长速率较快,而后期增长缓慢,当光照强度为 1 600~2 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,大喇叭口期叶片净光合速率趋于平衡。

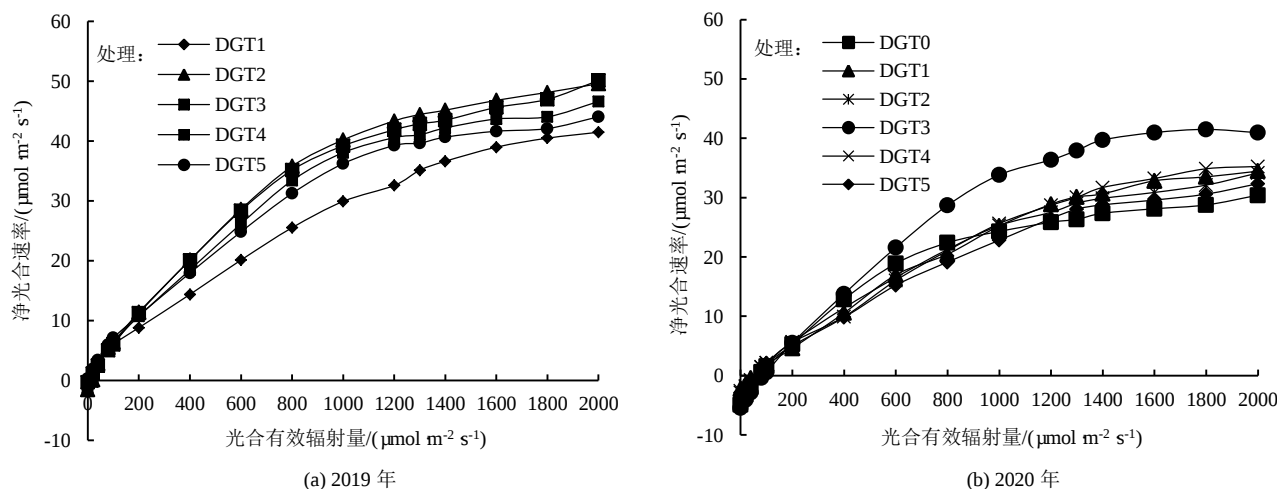


图6 2019、2020 年灌水量对玉米大喇叭口期最大展开叶的光响应曲线

Fig.6 Light response curves of irrigation amount to the maximum expanded leaf of maize at the flare stage in 2019 and 2020

由表 1 可知,不同灌水量下春玉米广德 5 大喇叭口期最大展开叶的光响应曲线拟合较好,均达到显著水平,其 R^2 均在 0.99 以上。根据表 1 中模拟出的最大净光合速率 (P_{max}) 可看出, DGT3 处理的最大。2019、2020 年 DGT3 处理下模拟的最大净光合速率分别为 58.586、50.005 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 2020 年 DGT3 处理模拟最大净光合速率分别比 DGT0、DGT1、DGT2、DGT4、DGT5 处理高 25.6%、22.0%、8.2%、17.0%、22.2%。2020 年各处理模拟的光响应曲线曲角 (K) 以 DGT3 处理最大, 2019 年在 DGT4 处理时

最大, 其值为 0.835。2019 年不同灌水量处理下模拟的表观量子效率 (Q) 从大到小依次为 DGT3、DGT2、DGT1 处理。2020 年不同灌水量处理下模拟的表观量子效率 (Q) 从大到小依次为 DGT0、DGT3、DGT4 处理。2019 年模拟出的暗呼吸速率在 DGT2 处理下的最高; 2020 年各处理模拟出的暗呼吸速率 (R_d) 以 DGT3 最大, 其值为 4.708 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。2019 年和 2020 年模拟的光饱和点 (LSP) 分别在 DGT1 处理和 DGT4 处理下最大。2019、2020 年的光补偿点 (LCP) 分别在 DGT2、DGT3 处理下最大。

表 1 2019、2020 年灌水量对玉米大喇叭口期最大展开叶光响应曲线模拟参数

Table 1 Simulation parameters of irrigation amount on the maximum expanded leaf light response curve of maize at the flared stage in 2019 and 2020

年份	处理	$P_{\max}/(\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	K	$Q/(\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$R_d/(\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$LSP/(\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$LCP/(\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	R^2
2019	DGT1	53.892	0.810	0.050	0.161	1078.91	3.21	0.995
	DGT2	56.507	0.805	0.059	0.228	958.35	3.84	0.999
	DGT3	58.586	0.704	0.061	0.058	964.53	0.95	0.999
	DGT4	51.505	0.835	0.053	0.032	965.10	0.59	0.998
	DGT5	51.574	0.749	0.056	0.209	931.34	3.75	0.995
2020	DGT0	39.819	0.592	0.059	4.380	750.39	74.35	0.999
	DGT1	40.984	0.898	0.033	1.775	1311.63	54.46	0.999
	DGT2	46.224	0.651	0.041	2.362	1190.81	57.88	0.999
	DGT3	50.005	0.920	0.049	4.708	1125.78	96.86	0.999
	DGT4	42.756	0.895	0.032	1.781	1378.87	55.15	0.999
	DGT5	40.908	0.823	0.033	2.002	1312.21	61.22	0.998

2.6 灌水量对大喇叭口期干物质的影响

由表 2 可知, 2019、2020 年不同滴灌处理对广德 5 大喇叭口期株高、全株干质量、叶干质量、茎干质量、鞘干质量的影响存在较大差异。2 a 全株干质量均以 DGT3 处理下最大, 而 2019 年为 DGT2 处理最小, 2020 年则为 DGT0 处理最小。分析 2019 年全株干物质变化, DGT3 处理比 DGT1、DGT2、DGT4、

DGT5 处理分别高 14.1%、17.8%、28.9%、12.1%。DGT3 处理与 DGT1 处理之间差异达到显著水平。2020 年的全株干质量在 DGT3 处理下最高, DGT3 处理比 DGT0、DGT1、DGT2、DGT4、DGT5 处理分别高 84.5%、56.2%、9.2%、6.7%、18.7%。DGT3 处理与 DGT0、DGT1 处理之间均差异显著。

表 2 2019、2020 年灌水量对玉米大喇叭口期干物质积累的影响

Table 2 Effect of irrigation amount on dry matter accumulation of maize at the flare stage in 2019 and 2020

年份	处理	株高/cm	全株干质量/g	叶干质量/g	茎干质量/g	鞘干质量/g
2019	DGT1	195.87 b	97.86 b	37.23 a	48.3 a	12.33 b
	DGT2	215.70 a	94.79 b	34.06 ab	44.73 b	16.00 a
	DGT3	218.73 a	111.63 a	38.13 a	54.83 a	18.67 a
	DGT4	209.9 ab	86.59 c	31.1 b	38.16 c	17.33 a
	DGT5	224.03 a	99.6 b	33.2 b	49.73 a	16.67 a
2020	DGT0	134.20 e	51.67 d	27.67 b	13.33 d	10.67 b
	DGT1	206.10 cd	61.00 c	28.00 b	20.67 c	12.33 b
	DGT2	203.77 d	87.33 a	38.00 a	33.33 ab	16.00 a
	DGT3	215.30 bc	95.33 a	38.67 a	38.00 a	18.67 a
	DGT4	219.93 ab	89.33 a	36.33 a	35.67 a	17.33 a
	DGT5	228.70 a	80.33 b	35.00 a	28.67 b	16.67 a

注 各列小写字母代表在 $P<0.05$ 水平下各处理差异显著。

3 讨论

通常利用净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 摩尔分数等气体交换参数指标来反映光合能力的强弱^[21]。前人研究^[22]发现, 土壤含水率降低会在一定程度上造成光合速率的下降, 从而进一步影响产量。因此玉米要获得稳产高产就需依靠合理的灌溉^[23]。前人研究^[24-25]表明, 水分胁迫会影响植物的气孔导度、

蒸腾速率、净光合速率、胞间 CO_2 摩尔分数, 本研究中随着灌水量的增加, 玉米的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率呈先增加后降低的趋势。苏康妮等^[26]研究发现, 由于中午气温较高, 为了减少水分的大量散失, 所以气孔暂时关闭, 玉米叶片气孔导度、蒸腾速率日变化呈双峰曲线, 玉米的群体光合速率变化趋势一致^[27]。本研究表明, 不同灌水量对玉米大喇叭口期最大展开叶叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速

率日变化的影响均呈双峰曲线变化趋势,可能与中午气孔关闭有关。

植物光合作用能力的强弱可以利用植物净光合速率对光照强度的响应曲线来进行分析^[28],因此,测定植物的光响应曲线对于判定植物的光合能力具有重要意义。光响应曲线反映的是净光合速率 P_n 对光合有效辐射 PAR 的动态响应过程^[29],在前期生长较快,在后期增长缓慢,这与本研究结果一致。水分胁迫会造成植物的最大净光合速率下降,而适宜的水分条件会增加植物的 P_{max} ,同时也可以促进植物维持较高的量子产额^[30-31]。本研究通过曲线拟合得出表观量子效率在 0.032~0.059 变化,各处理模拟的最大净光合速率 (P_{max}) 最大为 DGT3 处理:在一定程度上说明了灌水量对植株生长条件的适宜程度以及对光合速率的影响。

光合作用合成的产物是干物质积累的主要来源^[32]。光合作用合成的产物为后期籽粒的建成提供物质来源,从而进一步提升产量^[33-34]。水分胁迫会影响玉米植株的形态和表型特征的变化,并且对各个时期干物质积累具有很大的影响^[14, 35]。尤其在大喇叭口期光合作用积累的碳同化底物,为后期干物质积累以及分配提供基础^[36]。本研究表明,水分在影响光合作用的同时,对大喇叭口期单株干质量、茎干质量、叶干质量也影响显著,并且 2 a 均以 DGT3 ($945 \text{ m}^3/\text{hm}^2$) 处理下的干物质积累最高,说明灌水量过多或者过少都会对玉米的生长产生影响。

4 结 论

大喇叭口期不同灌水量下,各处理下的蒸腾速率、气孔导度以及净光合速率日变化均呈双峰曲线变化,达到双峰时间相同,但峰值大小存在一定差异;而各灌水量的胞间 CO_2 摩尔分数日变化则呈先降低后升高的“V”字形曲线变化趋势。不同灌水量的光响应曲线拟合较好,2019、2020 年的最大净光合速率和单株干物质量均以 DGT3 处理最大。综上可知,在内蒙古中西部地区春玉米较适宜的灌水量为 $945 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

参考文献:

- [1] 白美兰,郝润全,高建国,等. 内蒙古地区气候资源生产潜力及其人口承载力分析评估[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 253-257.
- [2] 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.
- [3] 杨恒山,薛新伟,张瑞富,等. 灌溉方式对西辽河平原玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 69-77.
- [4] 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.
- [5] 段巍巍,赵红梅,郭程瑾,等. 夏玉米光合特性对氮素用量的反应[J]. 作物学报, 2007, 33(6): 949-954.
- [6] 刘剑钊,袁静超,周康,等. 不同氮肥施用水平对春玉米光合特性及产量构成的影响[J]. 玉米科学, 2019(5): 151-157.
- [7] 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.
- [8] 张丽娟,杨升辉,杨恒山,等. 高产栽培下氮肥运筹对春玉米光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(5): 2 598-2 601.
- [9] 白莉萍,隋方功,孙朝晖,等. 土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1 556-1 560.
- [10] 贾金生,刘昌明,王会肖. 夏玉米水分胁迫效应的试验研究[J]. 中国生态农业学报, 2002(2): 97-101.
- [11] 白向历,孙世贤,杨国航,等. 不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(2): 60-63.
- [12] 吕丽华,贾秀领,姚海坡,等. 不同灌水模式对夏玉米产量和植株性状的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(S1): 153-159.
- [13] 田亚楠,李成. 玉米大喇叭口期要精管[J]. 河北农业, 2012(7): 8.
- [14] 梁涛,刘景利. 水分胁迫对玉米生长发育和产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(35): 17 436-17 437, 17 472.
- [15] 樊廷录,杨珍,王建华,等. 灌水时期和灌水量对甘肃河西玉米制种产量和水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 1-6.
- [16] 桑玉强,吴文良,张劲松,等. 毛乌素沙地杨树防护林内紫花苜蓿蒸散耗水规律的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 44-49.
- [17] 李小忠,孙继颖,高聚林,等. 灌溉量和种植密度互作对春玉米花期光合性能及籽粒产量的影响[J]. 北方农业学报, 2021, 49(1): 23-33.
- [18] TERASHIMA I, SAEKI T. A new model for leaf photosynthesis incorporating the gradients of light environment and of photosynthetic properties of chloroplasts within a leaf[J]. Annals of Botany, 1985, 56(4): 489-499.
- [19] QIU J. China faces up to groundwater crisis[J]. Nature, 2010, 466(7 304): 308.
- [20] 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.
- [21] 张乐,尹娟,王怀博,等. 不同灌水处理对玉米生长特性及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 24-29.
- [22] 郑盛华. 水分胁迫对玉米生理生态特性影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007: 2-10.
- [23] 卜令铎,张仁和,常宇,等. 苗期玉米叶片光合特性对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1 184-1 191.
- [24] 孙龙飞. 水稻根系干旱胁迫对叶片光合荧光特性的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
- [25] 张正红. 调亏灌溉对设施葡萄生长及光合指标影响研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.

- [26] 苏康妮, 马雨荷, 廖晨宇, 等. 核桃|玉米间作对植物光合日变化、地上部及根系特性的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(15): 5 213-5 220.
- [27] 王庆成, 刘开昌, 张秀清, 等. 玉米的群体光合作用[J]. 玉米科学, 2001, 9(4): 57-61.
- [28] 陆佩玲, 罗毅, 刘建栋, 等. 华北地区冬小麦光合作用的光响应曲线的特征参数[J]. 应用气象学报, 2000, 11(2): 236-241.
- [29] 叶子飘. 光合作用对光响应新模型及其应用[J]. 生物数学学报, 2008, 23(4): 710-716.
- [30] 贺正. 基于手机照片的滴灌玉米光响应特征与穗形态监测[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [31] 马莉. 荒漠绿洲区春小麦生长与水分利用效率研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013.
- [32] 武婕, 李玉环, 李增兵, 等. 基于 SPOT-5 遥感影像估算玉米成熟期地上生物量及其碳氮累积量[J]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(1): 64-74.
- [33] 肖武, 陈佳乐, 宣宏志, 等. 基于无人机影像的采煤沉陷区玉米生物量反演与分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 169-180.
- [34] 刘明, 张忠学, 郑恩楠, 等. 不同水氮管理模式下玉米光合特征和水氮利用效率试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 27-34.
- [35] 蒋菊芳, 景元书, 王润元, 等. 灌溉春玉米大喇叭口期光合特性及水分利用效率研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(27): 76-82.

Effect of Irrigation Amount on the Diurnal Changes of Photosynthesis and Dry Matter Accumulation of Maize in the Horn Mouth Stage

MENG Tiantian^{1,4}, DU Xiangyu², ZHANG Xiangqian^{3,4*}, CHEN Lirong¹,
LU Zhanyuan^{2,3,4,5}, LAN Huiqing⁵, LIU Yajie⁵, WU Di⁵

(1. Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2. Mengcao Ecological Environment (Group) Co., Ltd., Hohhot 010070, China; 3. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 4. Key Laboratory of Ecological Restoration and Pollution Prevention of Degraded Farmland of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010031, China; 5. Inner Mongolia University, Hohhot 010020, China)

Abstract: 【Objective】 To reveal the diurnal change rule of photosynthesis of spring maize under different irrigation amount at the big bell mouth stage, further clarify the difference of dry matter accumulation of maize. 【Method】 Taking the spring maize variety Guangde 5 as the experimental material, the experiment began in 2018, and set five irrigation amount in 2019, namely DGT1 (315 m³/hm²), DGT2 (645 m³/hm²), DGT3 (945 m³/hm²), DGT4 (1 275 m³/hm²), DGT5 (1 605 m³/hm²), and added no irrigation rain fed control (DGT0) in 2020, The effects of irrigation amount on the diurnal changes of photosynthetic characteristics, light response curves and dry matter accumulation of the largest unfolding leaves of spring maize at the bell mouth stage were analyzed. 【Result】 The results showed that with the increase of irrigation amount, the diurnal changes of photosynthetic rate (*Pn*), stomatal conductance (*Gs*) and transpiration rate (*Tr*) in each treatment showed a bimodal curve trend, and there was a midday rest phenomenon. The time to reach the bimodal was the same, and the peak values were different; However, the diurnal variation of intercellular CO₂ concentration (*Ci*) of each treatment showed a "V" shaped curve that decreased first and then increased. The light response curves of different irrigation amount were well fitted. The maximum net photosynthetic rate of DGT3 treatment was the largest in 2020 and 2019. The maximum net photosynthetic rate of DGT3 treatment in 2019 was 8.71%, 3.68%, 13.75% and 13.59% higher than that of DGT1, DGT2, DGT4 and DGT5 treatment respectively. In 2020, the maximum net photosynthetic rate of DGT3 treatment was 25.6%, 22.0%, 8.2%, 17.0% and 22.2% higher than that of DGT0, DGT1, DGT2, DGT4 and DGT5 treatment respectively. In 2019, the dry matter of single plant in DGT3 was 14.1%, 17.8%, 28.9% and 12.1% higher than that in DGT1, DGT2, DGT4 and DGT5 respectively. In 2019 and 2020, there were significant differences between DGT3 treatment and DGT1 treatment (*P*<0.05). 【Conclusion】 It was concluded that the appropriate irrigation amount spring maize was 945 m³/hm².

Key words: spring maize; irrigation amount; diurnal variation in photosynthesis; light response curve; dry matter

责任编辑: 白芳芳