

▪ 作物水肥高效利用 ▪

文章编号: 1672-3317 (2023) 09-0001-08

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

师晶晶^{1,2}, 兰慧青^{1,2}, 张向前^{3,4*}, 路战远^{1,3,4*}, 步恒通^{1,2},
白东星^{1,2}, 程玉臣^{3,4}, 杜香玉⁵, 王满秀^{1,2}, 陈宣伊^{1,2}

(1.内蒙古大学 生命科学学院, 呼和浩特 010020; 2.牧草与特色作物生物学教育部重点实验室,
呼和浩特 010020; 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治理重点实验室, 呼和浩特 010031;
5.内蒙古蒙草生态环境(集团)股份有限公司, 呼和浩特 010070)

摘 要:【目的】探究增密种植条件下滴灌量对籽粒机收玉米干物质积累分配规律及产量形成的影响。【方法】以 2018 年在内蒙古自治区农牧业科学院试验田开始的长期定位滴灌灌溉试验为基础, 设置 W1 (415 m³/hm²)、W2 (645 m³/hm²)、W3 (945 m³/hm²)、W4 (1 275 m³/hm²)、W5 (1 605 m³/hm²) 5 个滴灌量, 以自然雨养为对照 (CK), 定量分析籽粒机收玉米地上部干物质积累分配规律, 构建 Logistic 模型拟合玉米干物质积累动态, 探究不同滴灌水平下干物质积累分配规律及灌水量与产量的关系和差异性。【结果】灌水可显著提高玉米单株地上部干物质积累量, 不同处理玉米干物质积累过程符合 Logistic 模型, 拟合度 R² 均在 0.888 0 以上, 2 a 干物质积累量的最大增长速率均表现为随灌水量增加而增加, 以 CK 最低, W5 处理最高。2020、2021 年生物产量均以 W5 处理最高, 收获指数分别以 W4 处理和 W3 处理最高, 分别为 0.51 和 0.50。与 CK 相比, 灌水处理降低成熟期干物质在营养器官中的分配比例, 但提高了籽粒干物质分配比例。随着灌水量增加, 2020 年经济产量呈先升高后降低趋势, W4 处理最大为 14 282.42 kg/hm²; 2021 年经济产量呈随灌水量增加而升高趋势, W4 (15 480.33 kg/hm²) 处理和 W5 (15 892.52 kg/hm²) 处理显著高于其余处理。【结论】适宜的灌水量能够显著提高干物质积累速率, 增加籽粒机收玉米地上部干物质积累量并促进干物质向籽粒分配, 在年自然降水量 364.2~390.7 mm 范围的干旱年, 种植密度为 7.5×10⁴ 株/hm² 的情况下, 内蒙古中西部干旱、半干旱地区以每年 1 275 m³/hm² 的滴灌灌水量进行灌溉为最佳。

关键词: 滴灌量; 籽粒机收玉米; Logistic 方程; 干物质分配和转运; 玉米产量

中图分类号: S275.6; S513

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023022

OSID:



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 Jingjing, LAN Huiqing, ZHANG Xiangqian, 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.

0 引言

【研究意义】水是作物生命活动的主要限制因子之一, 对作物的生长发育、产量与品质的形成都至关重要。内蒙古自治区黄河流域部分处在半干旱、干旱

甚至极端干旱地区, 区域水资源短缺问题已经成为限制粮食作物生长的关键因素。受气候变化影响, 水资源时空分布不均愈加严重, 对于干旱、半干旱地区农业系统产生了严重的负面影响^[1-2]。玉米作为内蒙古自治区乃至全国播种面积最大、产量最高的作物^[3], 以饲用、工业和粮食消费为主, 是发展中国家主要食物来源^[4]。合理密植可协调个体和群体之间的补偿效应, 能有效提高玉米产量^[5], 在此基础上, 采用规模化种植方式、提高机械化程度是当前农业生产实践中满足生产需要、降低农户成本的有效途径。玉米籽粒机收是提升玉米全程机械化生产程度的主要环节之一^[6], 但内蒙古沿黄河流域玉米籽粒机收方式的大面积推广受水资源条件及节水灌溉制度不明确限制, 因此

收稿日期: 2023-01-19 修回日期: 2023-05-10 网络出版日期: 2023-08-21
基金项目: 内蒙古自治区“科技兴蒙”重点专项(2021EEDSCXSQZD011); 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0064); 内蒙古自治区人才引进项目(2020YJ007); 内蒙古自治区草原英才项目(CY2020016)

作者简介: 师晶晶(1999-), 女。硕士研究生, 主要从事逆境栽培与农业生态等方面的研究。E-mail: 15848929502@163.com

通信作者: 张向前(1984-), 男。研究员, 主要从事土壤耕作与农业生态等方面的研究。E-mail: zhangxiangqian2008@126.com

路战远(1964-), 男。研究员, 主要从事保护性耕作与农业生态等方面的研究。E-mail: lzhy281@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

制定增密条件下合理的节水灌溉制度,对于应对气候变化、提高籽粒机收玉米的产量具有重要的现实意义。

【研究进展】玉米籽粒机收技术是玉米产业发展中实现全程机械化的关键^[7],国内多个研究团队针对品种选育、增密栽培、收获机械配套与应用展开了深入研究^[8],尤其是自“十三五”以来,逐步形成了从无到有、从点到面、从北到南的总趋势。近年来,关于滴灌在农业生产中的研究已经较为全面,合理运用滴灌技术,有助于水资源科学利用,保持土壤肥力,减少水土流失^[9],极大地降低灌溉过程中水资源浪费量^[10]。此外,玉米具有高灌溉需求且对水分胁迫敏感^[11],采用滴灌技术后,能够显著提高玉米的成苗株数和单位面积产量^[12]。魏育国等^[13]对比了滴灌、喷灌和漫灌3种灌溉方式,发现滴灌处理下,玉米干物质积累量最高,产量构成更为合理,有利于达到稳产增产的效果。玉米作为一种具有高光合利用率的C₄作物,合理密植可提高其光能利用效率^[14];干物质作为光合作用的产物,其积累和分配规律是玉米产量形成的基础^[15]。灌溉水平对玉米生长期干物质积累具有显著影响^[16],在一定范围内,产量与干物质积累量正相关^[17],土壤水分会影响作物光合物质生产量以及光合产物在产品与非产品器官之间的分配^[18],适宜的滴灌量对于旱地区籽粒产量形成具有显著促进作用^[19]。

【切入点】在不同滴灌水量以及水分亏缺和渍水条件下,玉米生长发育和产量形成的差异性研究已较为充分,但内蒙古沿黄河流域籽粒机械化收获才刚刚起步,增密种植条件下,内蒙古中西部地区籽粒机收玉米干物质积累分配及产量对滴灌水量的响应规律尚不明确。【拟解决的关键问题】基于2018年在内蒙古自治区农牧业科学院试验田开展的长期定位滴灌试验,采用Logistic模型拟合不同处理下生育期内玉米单株地上部干物质积累量的变化过程,探究各滴灌水平下干物质积累分配以及产量和收获指数的变化,明确适宜区域内增密种植条件下籽粒机收玉米增产稳产的滴灌水量,为内蒙古中西部地区合理灌水量选择与节水灌溉制度制定提供理论技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2018年开始在内蒙古自治区农牧业科学院试验田(40°82'N, 111°65'E, 海拔1040 m)进行。该地区属于典型的中温带大陆性季风气候,主要特征为雨热同期、干旱多风,四季特征明显,无霜期113~134 d,平均年日照时间2668.00 h(1990—2019年)。年平均气温7℃左右,2020年和2021年平均气温分别为7.0℃和7.9℃。2020年全年日照时间

为2817.8 h,2020年和2021年全生育期有效积温分别为1302.8℃和1355.9℃,年平均降水量为408.9 mm(1998—2019年),2020、2021年降水量分别为364.2、390.7 mm,根据干旱系数法^[20]计算可得2020、2021年均均为枯水年。2020、2021年全年各月降水量及平均气温如图1所示。试验地土壤类型为壤土,前茬作物为玉米,有机质量为17.68 g/kg,全氮量为1.12 g/kg,全磷量为0.57 g/kg,碱解氮量为49.25 mg/kg,速效磷量为28.70 mg/kg,速效钾量为93.58 mg/kg,最大田间持水率23%~25%,pH值为7.89,0~20 cm土层土壤体积质量为1.18 g/cm³。

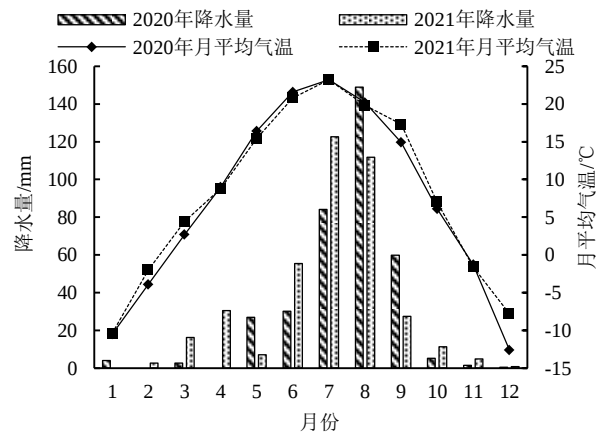


图1 2020年和2021年各月降水量及月平均气温

Fig.1 Monthly precipitation and average temperature in 2020 and 2021

1.2 供试材料

供试玉米品种为广德5(吉林广德农业科技有限公司)。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

本试验以滴灌灌水量为唯一变量,雨养处理为对照(CK),各处理单次及全生育期滴灌量如表1所示,共计6个处理,每个处理3次重复,共计18个小区,小区面积28 m²。灌溉方式采用不覆膜滴灌,每年在生育期中6、7、8月进行灌水,2个试验年份首次灌水时间均为6月25日,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。2020年在4月25日播种,10月8日收获,全生育期151 d;2021年在5月5日播种,10月10日收获,全生育期143 d。玉米采用等行距播种,行距60 cm,株距22.2 cm,保苗密度为7.5×10⁴株/hm²。玉米播种时施用磷酸二铵(ω(N):ω(P₂O₅):ω(K₂O)=18:46:0)300 kg/hm²、硫酸钾(K₂O 51%)120 kg/hm²以及尿素(N 46%)75 kg/hm²,拔节期追施尿素(N 46%)300 kg/hm²。各处理其他田间管理方式均相同。

表 1 各处理单次及全生育期滴灌量
Table 1 Drip irrigation amount for single time and whole birth period of different treatments

处理	CK	W1	W2	W3	W4	W5
单次滴灌量/(m ³ hm ⁻²)	0	105	215	315	425	535
全生育期滴灌量/(m ³ hm ⁻²)	0	415	645	945	1 275	1 605

1.4 测定指标与方法

1.4.1 干物质积累量和分配量

当小区内超过 50% 的玉米植株表现出该生育期特征时，定为试验田玉米达到了相应生育期，试验中玉米生育期划分为苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄吐丝期、灌浆期、成熟期。每个生育期从各处理小区选取 3 株长势均匀的植株，苗期和拔节期将植株拆分成茎和叶 2 部分，大喇叭口期将植株拆分成茎、叶、鞘 3 部分，抽雄吐丝期增加轴和苞叶，灌浆期和成熟期将整个植株分成叶、茎、鞘、轴、苞叶和籽粒 6 个部分，经 105 °C 条件下杀青 0.5 h，再于 80 °C 条件下烘干至恒质量，测定全株干质量及各部分干质量。

采用 Logistic 方程拟合玉米干物质积累过程（式（1）），对式（1）进行求导可得增长速率方程（式（2）），对式（2）进行求导，并令所得导数等于 0，可得最大干物质积累速率（式（3））及达到最大积累速率时对应的出苗后天数（式（4））。

$$D = \frac{M}{1 + Ae^{-kt}}, \quad (1)$$

$$v = \frac{MAke^{-kt}}{(1 + Ae^{-kt})^2}, \quad (2)$$

$$v_{\max} = \frac{kM}{4}, \quad (3)$$

$$T = \frac{\ln A}{k}, \quad (4)$$

式中：D 为不同时期干物质积累量（g）；M 为干物质积累潜力，即最大干物质质量（g）；A、k 为模型固定系数；e 为自然常数；t 为出苗后天数（d）；v 为单株干物质积累速率（g/d）；T 为干物质积累速率达到最大值时对应的出苗后天数（d）。

叶茎鞘苞叶干物质转移量 = 抽雄-吐丝期叶茎鞘苞叶干质量 - 成熟期叶茎鞘苞叶干质量，

叶茎鞘苞叶干物质转移率 = (叶茎鞘苞叶干物质转移量 / 抽雄-吐丝期叶茎鞘苞叶干质量) × 100%，

叶茎鞘苞叶干物质贡献率 = (叶茎鞘苞叶干物质转移量 / 成熟期籽粒干质量) × 100%。

1.4.2 产量

收获期各小区取 2 行玉米，每行连续取 10 株果穗，每处理共 60 株果穗，脱粒后测其粒质量及水分，计算经济产量及收获指数。

$$\text{生物产量: } y = \frac{d \times 7.5 \times 10^4}{1000}, \quad (8)$$

$$\text{经济产量: } Y = \frac{c \times 75000}{20} \times \frac{100-f}{100} \div 0.86 \times 0.85, \quad (9)$$

$$\text{收获指数: } \varepsilon = \frac{Y}{y}, \quad (10)$$

式中：y 为生物产量（kg/hm²）；d 为单株干质量（g）；Y 为经济产量（kg/hm²）；c 为收获前 20 株果穗脱粒后籽粒质量（g）；f 为收获前 20 株果穗脱粒后含水率（%）；0.86 为 14% 标准含水率的换算系数；0.85 为校正系数；ε 为收获指数。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2016 处理数据及绘图，使用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析（ANOVA），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 滴灌量对籽粒机收玉米生育期干物质积累规律的影响

随着生育期推进，各滴灌处理下玉米单株地上部干物质积累量均呈上升趋势，并在成熟期达到最大值（图 2）。与 CK 相比，灌水提高了玉米单株地上部干物质积累量，随着灌水量增加，部分生育阶段干物质积累量出现下降趋势。2020 年灌水后，大喇叭口期和抽雄吐丝期玉米单株地上部干物质积累量随滴灌量增加呈先增加后降低的变化趋势，均为 W3 处理最高，W4 处理次之，CK 最低；灌浆期和成熟期表现为 W5 处理最高。成熟期 W1、W2、W3、W4、W5 处理干物质积累量分别为 CK 的 1.10、1.21、1.32、1.35、1.35 倍。2021 年各生育期玉米单株地上部干物质积累量在不同滴灌水平下的变化趋势与 2020 年相同，大喇叭口期和抽雄吐丝期在 W4 处理达到最大值，灌浆期 W4、W5 处理高于其余处理，成熟期玉米单株地上部干物质积累量在各处理之间存在差异，W1、W2、W3、W4、W5 处理分别较 CK 提高 7.31%、24.48%、33.18%、43.74%、54.52%。

对不同滴灌处理下干物质积累量进行 Logistic 方程拟合，如表 2 所示。由表 2 可知，2 a 不同滴灌水平下干物质积累最大速率均表现为 W5 处理 > W4 处理 > W3 处理 > W2 处理 > W1 处理 > CK，2020 年 W5 处理显著高于 CK，2021 年 W4、W5 处理显著高于其他处理（P < 0.05）。2020 年 CK 干物质积累最大速率出现时间最早，W2 处理最晚，W2、W4 处理显著晚于 CK 和 W1 处理；2021 年出苗后 W4 处理不同滴灌处理下干物质积累最大速率出现时间最早，为出苗后 61.77 d，CK、W1、W2、W3、W5 处理分别比 W4 处理晚 6.38、2.11、3.20、2.49、4.73 d，其中 W4 处理显著早于 CK。

2.2 滴灌量对籽粒机收玉米生育期干物质分配规律的影响

灌水降低了大喇叭口期和抽雄吐丝期玉米干物质在叶中的分配比例，增加了茎中的干物质分配比例

(图 3)。抽雄吐丝期, 2020 年叶和鞘中干物质分配比例随灌水量增加而减少, 而茎中的干物质分配比例则呈随灌水量增加先增加后降低趋势, W3 处理茎干物质分配比例最大为 40.83%, CK 低于其他处理; 2021 年, 茎中的干物质分配比例以 W4 处理最大。灌水增加灌浆期籽粒干物质质量, 但 2 a 籽粒干物质分配比例

变化趋势不同, 2020 年 W3、W4、W5 处理低于 CK, 2021 年 W3、W4、W5 处理高于 CK。2021 年成熟期, 灌水降低了干物质在营养器官的分配比例, 在籽粒中的分配比例呈随滴灌量增加先升高后降低的趋势, W4 处理籽粒干物质分配比例达到最大为 58.32%, CK 低于其他处理。

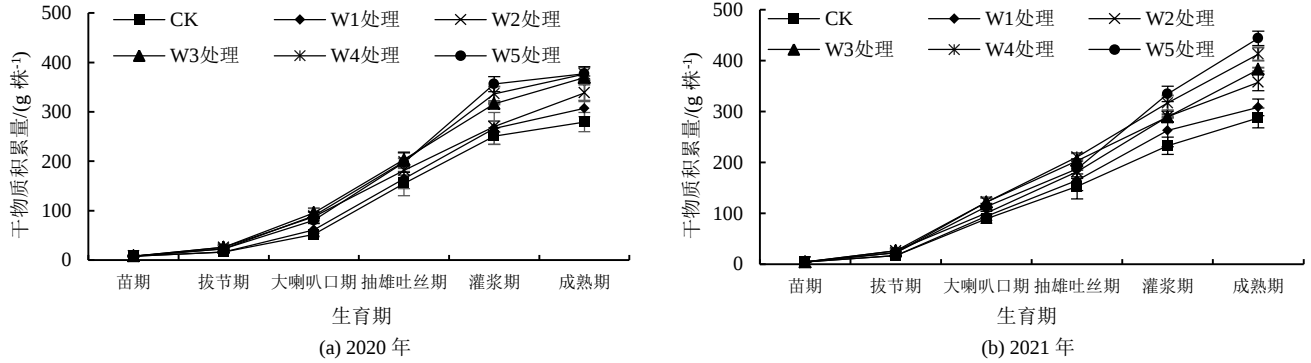


图 2 2020、2021 年不同滴灌量处理下籽粒机收玉米单株地上部干物质积累量动态变化

Fig.2 Dynamic changes of dry matter accumulation in above-ground per plant of grain harvesting maize under different drip irrigation treatments in 2020 and 2021

表 2 不同处理籽粒机收玉米干物质积累过程 Logistic 方程及其特征值

Table 2 Logistic equation and their eigen values of dry matter accumulation process of maize under different treatments

年份	处理	回归方程	R^2	最大生长速率/(g·d ⁻¹)	干物质积累最大速率出现时间/d
2020	CK	$y=287.53(1+36.23e^{-0.0637x})$	0.973 2	4.54 b	57.57 b
	W1	$y=307.03(1+38.57e^{-0.0633x})$	0.973 0	4.89 ab	58.29 b
	W2	$y=369.33(1+46.33e^{-0.0547x})$	0.939 7	5.05 ab	70.15 a
	W3	$y=338.30(1+42.50e^{-0.0600x})$	0.957 1	5.07 ab	62.29 ab
	W4	$y=376.77(1+47.48e^{-0.0569x})$	0.938 8	5.38 ab	67.84 a
	W5	$y=379.37(1+47.70e^{-0.0631x})$	0.978 1	5.97 a	61.53 ab
2021	CK	$y=361.33(1+88.33e^{-0.0657x})$	0.907 0	5.93 c	68.15 a
	W1	$y=380.33(1+93.19e^{-0.0711x})$	0.888 0	6.73 b	63.89 ab
	W2	$y=394.33(1+96.47e^{-0.0704x})$	0.908 2	6.92 b	64.97 ab
	W3	$y=390.67(1+95.61e^{-0.0710x})$	0.892 2	6.92 b	64.26 ab
	W4	$y=421.00(1+102.86e^{-0.0750x})$	0.891 3	7.89 a	61.77 b
	W5	$y=474.33(1+116.13e^{-0.0716x})$	0.914 9	8.48 a	66.50 ab

注 表中干物质积累最大速率出现时间为出苗后天数, 数值后不同小写字母代表处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著, 下同。

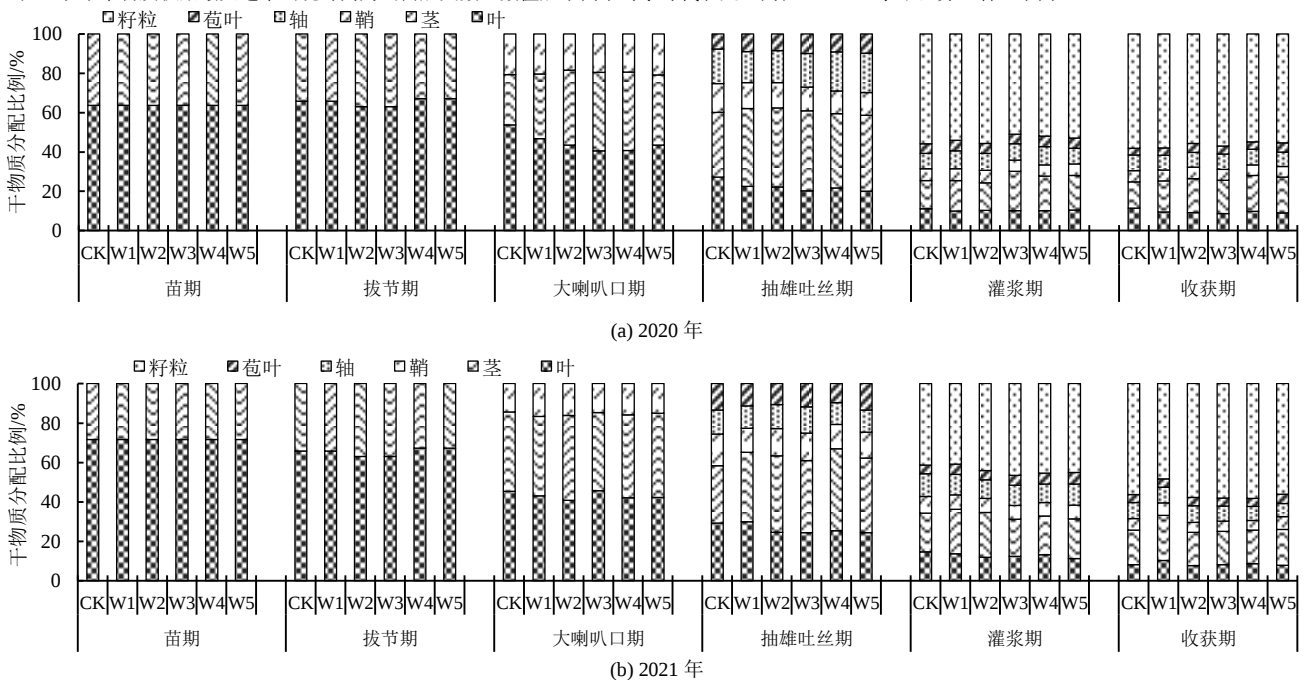


图 3 2020 年和 2021 年不同处理下籽粒机收玉米各器官干物质分配比例

Fig.3 Dry matter distribution ratio among organs of machine-harvested maize under different treatments in 2020 and 2021

由表 3 可知, 2020 年和 2021 年, 玉米叶、茎、鞘的干物质转移量和转移率均以 W4 处理最高, W4 处理茎的转移量、转移率及籽粒贡献率均显著高于 CK ($P<0.05$)。

转移量和转移率均以 W3 处理最高; 2021 年, 叶、茎、

表 3 2020、2021 年玉米各器官干物质转移量、转移率以及贡献率

Table 3 Dry matter transfer amount, transfer rate and contribution rate of maize organs in 2020 and 2021

年份	处理	转移量/g				转移率/%				贡献率/%			
		叶	茎	鞘	苞叶	叶	茎	鞘	苞叶	叶	茎	鞘	苞叶
2020	CK	10.00 a	14.33 b	6.67 a	2.00 bc	24.61 a	28.65 a	28.58 a	16.54 b	6.26 a	8.83 b	4.15 a	1.26 b
	W1	8.00 ab	17.00 b	4.67 ab	3.33 ab	21.35 ab	27.01 a	21.95 b	22.24 a	4.54 ab	9.54 b	2.62 ab	1.88 ab
	W2	8.00 ab	11.00 c	2.67 b	0.00 c	19.56 ab	15.16 b	11.26 c	-0.68 d	3.82 bc	5.23 c	1.27 b	-0.01 c
	W3	10.00 a	24.67 a	4.67 ab	4.67 a	24.17 a	29.75 a	18.67 b	22.89 a	5.28 ab	13.22 a	2.43 ab	2.51 a
	W4	6.00 b	6.33 d	3.00 b	3.67 a	13.79 b	8.47 b	13.12 c	20.51 a	2.93 c	3.06 d	1.47 b	1.77 ab
	W5	5.67 b	7.67 d	2.33 b	1.33 bc	14.76 b	7.67 b	10.23 c	6.80 c	2.72 c	2.74 d	1.12 b	0.63 c
2021	CK	15.67 b	-17.00 c	3.67 ab	5.67 ab	34.60 b	-41.43 d	12.51 ab	26.85 b	7.83 bc	-8.55 c	1.83 ab	2.88 ab
	W1	24.00 a	-13.00 c	1.33 ab	7.67 ab	38.01 ab	-17.79 c	4.58 b	32.12 ab	13.28 a	-7.20 c	0.84 ab	4.16 a
	W2	18.00 b	10.00 b	7.67 a	4.00 b	37.36 ab	13.13 b	27.78 a	17.66 c	7.86 bc	4.46 b	3.39 a	1.81 b
	W3	18.87 ab	10.33 b	8.67 a	9.00 a	36.71 ab	13.23 b	29.90 a	35.83 a	8.28 b	4.53 b	3.83 a	4.03 a
	W4	26.00 a	31.67 a	9.33 a	6.67 ab	44.37 a	31.85 a	31.57 a	31.19 ab	10.80 ab	12.90 a	3.78 a	2.72 ab
	W5	14.33 b	-7.00c	-2.67 b	5.67 ab	27.48 c	-10.98 c	-10.60 c	19.95 c	5.38 c	-2.55 c	-1.02 b	2.14 ab

2.3 滴灌量对籽粒机收玉米产量的影响

由表 4 可知, 增密种植条件下不同滴灌处理对籽粒机收玉米经济产量有显著影响, 2020、2021 年经济产量分别在 9 420.32~14 282.42、11 659.08~15 892.52 kg/hm² 之间, 2020 年 W4 处理显著高于 CK、W1、W3 处理, 与 CK、W1、W2、W3、W5 处理相比, W4 处理经济产量分别提高了 51.61%、29.63%、7.48%、13.22%和 7.25% ($P<0.05$)。2021 年经济产量呈随灌水量增加而增加的趋势, W5 处理经济产量最高, W5、W4 处理显著高于其他处理, 与 CK、W1、W2、W3、

W4 处理相比, W5 处理分别增加了 4 233.44、2 992.13、1 738.88、1 280.86、412.19 kg/hm²。2 a 籽粒机收玉米在增密种植条件下不同滴灌水平生物产量均以 W5 处理最高, 2020 年显著高于 CK、W1、W2、W3 处理, 但 W4、W5 处理差异不显著 ($P<0.05$); 2021 年 W5 处理显著高于其他处理 ($P<0.05$)。2020、2021 年籽粒机收玉米的收获指数分别在 0.45~0.51 和 0.43~0.50 之间, 2020 年 W4 处理显著高于 CK 和 W5 处理, 2021 年 W3、W4 处理显著高于 CK、W1、W5 处理 ($P<0.05$)。

表 4 2020 年和 2021 年不同滴灌处理下玉米产量和收获指数

Table 4 Maize yield and harvest index under different drip irrigation treatments in 2020 and 2021

处理	经济产量/(kg·hm ⁻²)		生物产量/(kg·hm ⁻²)		收获指数	
	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年
CK	9 420.32 d	11 659.08 c	20 947.50 d	27 100.00 c	0.45 c	0.43 c
W1	11 018.16 c	12 900.63 bc	23 027.50 cd	28 525.00 bc	0.48 abc	0.45 bc
W2	13 288.88 ab	14 153.39 ab	27 700.00 ab	29 575.00 bc	0.48 abc	0.48 ab
W3	12 614.37 b	14 611.66 ab	25 372.50 bc	29 300.00 bc	0.50 ab	0.50 a
W4	14 282.42 a	15 480.33 a	28 257.50 a	31 575.00 b	0.51 a	0.49 a
W5	13 316.77 ab	15 892.52 a	28 262.50 a	35 575.00 a	0.47 bc	0.45 bc

3 讨论

3.1 滴灌量对籽粒机收玉米生育期干物质积累规律的影响

干物质积累量常用于衡量作物有机物质的积累量^[21], 适宜范围内随灌水量升高呈先升高后降低的趋势^[22], 增密种植条件下, 玉米植株地上部干物质积累量是提高产量的关键因素之一^[23]。本研究中, 玉米植株地上部干物质积累量在 CK 与低灌水量处理下显著低于其他处理, 2020 年干物质积累量随灌水量增加呈先增加后降低的趋势, 这与人^[24]研究一致。高翠民等^[25]认为, 玉米需水关键期一大喇叭口期有效降水

可促进干物质积累及产量形成, 该生育期水分不足会造成作物减产, 本研究在 6、7、8 月进行灌水处理, 与雨养处理相比, 灌水显著提高成熟期干物质积累量, 有利于作物稳产增产。

适宜的灌水可以提高玉米植株地上部干物质积累速率。试验中 2 a 均以 W5 处理最高, 出苗后干物质积累最大速率出现时间存在一定差异, 2020 年为出苗后 57.57~70.15 d, 2021 年为出苗后 61.77~68.15 d, 均对应于玉米生育期中的大喇叭口期至抽雄吐丝期。本研究中, 2020 年 W4 处理玉米干物质积累最大增长速率出现时间显著晚于 CK, 侯云鹏等^[26]研究证明, 玉米干物质积累最大增长速率增加、干物质最大增长

速率出现天数推迟,有利于玉米高产,其原因在于适宜的灌水量可能延缓叶片衰老,使植株生长后期仍然保持较高的光合作用,增强光合效率及光合物质的生产能力,进而提高玉米花后干物质积累量。也有研究^[27]表明,苗期轻度干旱对玉米蹲苗及根系下扎具有促进作用,但适时复水可增加干物质积累速率,促进其补偿效应,拔节期复水能够产生明显的补偿效应,复水后株高、叶面积指数及干物质积累量均迅速增加。本研究中苗期均为雨养状态,给玉米生长造成一定程度的干旱胁迫,拔节期灌水处理后,补偿效应促使干物质积累迅速增加,并使得最大干物质积累速率出现时间提前。

3.2 滴灌量对籽粒机收玉米生育期干物质分配规律的影响

随着生育期推进,玉米植株的生长中心发生变化,营养器官(叶、茎、鞘、苞叶)干物质分配比例逐渐降低,籽粒干物质占比逐渐增加。2020年大喇叭口期和抽雄吐丝期地上部干物质在叶和鞘中的分配表现为随灌水量升高而逐渐降低趋势,在茎中的分配则呈先增高后降低趋势,鞘的变化趋势与叶相同,可能的原因是在一定范围内增加灌水量可以提高抽雄吐丝期玉米茎粗^[28],超过一定灌水量后继续增加灌水则会对茎的生长产生不利影响,灌水可能促进营养生长与生殖生长并进阶段中茎的生长,为籽粒形成积累营养物质。本试验中,2021年成熟期W5处理籽粒干物质在地上部植株干物质质量的占比高于CK,但低于其他处理;灌水促进干物质积累和籽粒产量的形成,但是过量灌水不利于干物质向籽粒转运,这与前人^[28-29]研究结果一致。适宜的灌溉有利于玉米籽粒干物质积累^[24],本试验中2021年灌浆期和成熟期玉米地上部干物质在籽粒中的分配随灌水量的增加呈单峰曲线变化,在W4处理达到最大值,而在其余器官中的分配则大体上呈先降低后升高的趋势。W5处理2a籽粒机收玉米营养器官干物质向籽粒的贡献率低于CK,表明水分过高不利于玉米营养器官吐丝前积累的干物质向籽粒转运,宋霄君等^[30]研究表明,干旱胁迫可提高小麦各营养器官干物质向籽粒的转运量,但会受到品种的影响。

3.3 滴灌量对籽粒机收玉米产量的影响

获得较高的经济产量是玉米生产的主要任务,而经济产量取决于生育期干物质积累、分配及转移的特征。玉米产量会随灌溉量增加而增加,一定程度上土壤水分亏缺不但可以维持产量稳定,还可以提高水分利用效率,有利于节约灌溉水资源^[31]。灌水影响作物根系空间分布,过量灌水导致土壤通透性变差,也易造成养分流失^[32],抑制根系向更深层土壤生长^[33],但

是仅依靠自然降水或低灌水量则又无法满足作物生长发育所需,本研究中,2020年和2021年经济产量分别随灌水量增加呈先升高后降低和持续增加的趋势,2020年和2021年均以CK最低,2020年随灌水量增加经济产量增加,在W4处理达到最大值后下降,表明过高或过低的灌水都对产量有不利影响。在较高产量水平下(大于15 000 kg/hm²),产量的增加主要是依靠干物质积累量的增加^[34]。在本研究中,2021年W4、W5处理的经济产量在15 000 kg/hm²以上,属于高产水平,干物质积累量和生物产量均以W5处理最高,但W5处理的收获指数仅高于CK,但与CK差异不显著,表明W5处理的高产是干物质积累增加的结果,这与Liu等^[34]的Meta分析结果一致。

在一定范围内,充分供水能使作物生长发育良好,获得高产,达到需水临界值后继续提高灌水量,玉米产量的增加趋于平缓,甚至减产。在灌水量保持不变时,生育期内灌水量和灌水频次不同均会改变玉米干物质积累规律从而影响产量形成^[35]。因此,在未来的研究中,结合自然降水对生育期内灌水量和灌水频次进行分配和控制,特别是拔节期、抽雄期及灌浆期的水分管理,进一步探究籽粒机收玉米不同生育期的水分需求,为内蒙古河套灌区促进节水灌溉技术的发展、提升作物水分利用效率和保障粮食安全提供理论依据和实践基础。

4 结 论

1) 适宜的灌水量能增加玉米单株干物质积累量,并显著提高玉米干物质积累速率,促进干物质由营养器官向生殖器官转运,调节干物质在籽粒中的分配比例,获得高经济产量和收获指数。

2) W4处理的2a经济产量均显著高于CK及低灌水量处理,并与高灌水量处理之间不存在显著差异,收获指数在2020年和2021年分别为最高值0.51、次高值0.49,故1 275 m³/hm²可作为内蒙古中西部地区籽粒机收玉米密植条件下的推荐滴灌灌水量。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 崔晨曦, 孟凡浩, 罗敏, 等. 基于地理探测器的内蒙古耕地水资源短缺时空变化特征及驱动力分析[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(1): 150-161.
- [2] CUI Chenxi, MENG Fanhao, LUO Min, et al. Spatio-temporal change characteristics and driving factors of cultivated land water shortage in Inner Mongolia based on the geographic detector model[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(1): 150-161.
- [3] SRIVASTAV A L, DHYANI R, RANJAN M, et al. Climate-resilient strategies for sustainable management of water resources and agriculture[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(31): 41 576-41 595.

- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National bureau of statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [4] SHIFERAW B, PRASANNA B M, HELLIN J, et al. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security[J]. Food Security, 2011, 3(3): 307-327.
- [5] 刘月, 明博, 李姚姚, 等. 基于根冠协调发展的东北春玉米高产种植密度分析[J]. 作物学报, 2023, 49(3): 795-807.
LIU Yue, MING Bo, LI Yaoyao, et al. Analysis on high yield planting density of spring maize in Northeast China from root and shoot coordinated development[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(3): 795-807.
- [6] 郭银巧, 徐文娟, 王克如, 等. 玉米典型生态区机械收获现状及影响农户采用的因子分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(11): 1 964-1 972.
GUO Yinqiao, XU Wenjuan, WANG Keru, et al. Actuality and factors influencing farmer adoption of mechanized harvesting in typical maize ecoregions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(11): 1 964-1 972.
- [7] 陈志, 郝付平, 王锋德, 等. 中国玉米收获技术与装备发展研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 44-50.
CHEN Zhi, HAO Fuping, WANG Fengde, et al. Development of technology and equipment of corn harvester in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 44-50.
- [8] 王克如, 李璐璐, 鲁镇胜, 等. 黄淮海夏玉米机械化粒收质量及其主要影响因素[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 1-7.
WANG Keru, LI Lulu, LU Zhensheng, et al. Mechanized grain harvesting quality of summer maize and its major influencing factors in Huanghuaihai region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 1-7.
- [9] 赵玲娟. 高效节水农业技术在玉米生产中的应用研究[J]. 智慧农业导刊, 2022, 2(12): 54-56.
- [10] 王建新. 农田水利工程高效节水灌溉技术的发展与应用[J]. 农机使用与维修, 2022(9): 130-132.
- [11] STONE P J, WILSON D R, REID J B, et al. Water deficit effects on sweet corn. I. Water use, radiation use efficiency, growth, and yield[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2001, 52(1): 103.
- [12] 蔡金光. 滴灌技术在玉米上的应用效果[J]. 现代农业科技, 2012(8): 251.
- [13] 魏育国, 陈雷, 蒋菊芳, 等. 灌溉方式和播期对地膜春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(6): 203-208.
WEI Yuguo, CHEN Lei, JIANG Jufang, et al. Effects of irrigation methods and sowing date on yield and water use efficiency of mulched spring maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(6): 203-208.
- [14] 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 Xiangqian, BAI Lanfang, LU Zhanyuan, et al. Light-response curves and yield of maize in grain-filling period[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(4): 96-103.
- [15] YANG Y S, GUO X X, LIU G Z, et al. Solar radiation effects on dry matter accumulations and transfer in maize[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 727 134.
- [16] EISSA M A, NEGIM O E. Nutrients uptake and water use efficiency of drip irrigated maize under deficit irrigation[J]. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42(1): 79-88.
- [17] 刘昕萌, 程乙, 刘玉文, 等. 黄淮海区域现代夏玉米品种产量与资源利用效率的差异分析[J]. 作物学报, 2023, 49(5): 1 363-1 371.
LIU Xinmeng, CHENG Yi, LIU Yuwen, et al. Difference analysis of yield and resource use efficiency of modern summer maize varieties in Huang-Huai-Hai region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(5): 1 363-1 371.
- [18] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 覆膜滴灌对玉米光合特性、物质积累及水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(1): 128-133.
JI Jinghong, LI Yuying, LIU Shuangquan, et al. Effect of drip irrigation under plastic film mulch on photosynthetic, dry matter accumulation and water use efficiency[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(1): 128-133.
- [19] 石磊, 吕宁, 陈云, 等. 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.
SHI Lei, LYU Ning, CHEN Yun, et al. Traits of different irrigation strategies on accumulation and distribution of dry matter and nutrient and their correlation with maize yield development[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(2): 103-108, 116.
- [20] 薛静, 李旭强, 陈军锋, 等. 不同降水年型下春玉米适宜秋浇模式的模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 80-87.
XUE Jing, LI Xuqiang, CHEN Junfeng, et al. Suitable irrigation scheduling for spring maize under different annual precipitation patterns in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(6): 80-87.
- [21] 王艳丽, 张富仓, 李菊, 等. 灌溉和施肥对河西地区春玉米生长、产量和磷素利用的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(9): 1 309-1 320.
WANG Yanli, ZHANG Fucang, LI Ju, et al. Effects of irrigation and phosphorus application on spring maize growth, yield and phosphorus utilization in Hexi region[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2021, 30(9): 1 309-1 320.
- [22] 杨恒山, 张明伟, 张瑞富, 等. 滴灌灌溉量、施氮量和种植密度对春玉米产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 16-22.
YANG Hengshan, ZHANG Mingwei, ZHANG Ruifu, et al. The combined impact of planting density and amount of water and nitrogen application on yield of spring maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(5): 16-22.
- [23] BERNHARD B J, BELOW F E. Plant population and row spacing effects on corn: Phenotypic traits of positive yield-responsive hybrids[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(3): 1 589-1 600.
- [24] 王平, 陈举林, 王均华, 等. 灌水模式对夏玉米耗水特性和干物质积累及分配的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(24): 20-27.
WANG Ping, CHEN Julin, WANG Junhua, et al. The effect of irrigation treatments on water consumption characteristic and dry matter accumulation in summer maize (zea mays)[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(24): 20-27.
- [25] 高翠民, 丁晋利, 张洁梅, 等. 水氮运筹对玉米产量及水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 44-51.
GAO Cuimin, DING Jinli, ZHANG Jiemei, et al. The combined effects of irrigation and nitrogen fertilization on yield and water and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 44-51.
- [26] 侯云鹏, 孔丽丽, 蔡红光, 等. 东北半干旱区滴灌施肥条件下高产玉米干物质与养分的积累分配特性[J]. 中国农业科学, 2019, 52(20): 3 559-3 572.
HOU Yunpeng, KONG Lili, CAI Hongguang, et al. The accumulation and distribution characteristics on dry matter and nutrients of high-yielding maize under drip irrigation and fertilization conditions in semi-arid region of Northeastern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(20): 3 559-3 572.
- [27] 张作合, 张忠学, 王立伟. 玉米苗期干旱拔节期补水补偿效应试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(1): 24-27.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue, WANG Liwei. Research on compensation effect of rewatering during jointing stage after soil drought at seedling stage[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(1): 24-27.
- [28] 王卫杰, 张彦群, 祁鸣笛, 等. 滴灌灌水量对玉米耗水及生长的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(10): 1 063-1 068.
WANG Weijie, ZHANG Yanqun, QI Mingdi, et al. Effects of drip irrigation amount on water consumption and growth of maize[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020,

- 38(10): 1 063-1 068.
- [29] 徐晨, 闫伟平, 孙宁, 等. 不同灌水处理对春玉米生理特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 7-14.
XU Chen, YAN Weiping, SUN Ning, et al. The impacts of irrigation amount on physiological characteristics and yield of spring maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 7-14.
- [30] 宋霄君, 张敏, 李秉昌, 等. 干旱胁迫对小麦营养器官物质转运和籽粒灌浆特性的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(15): 25-31.
SONG Xiaojun, ZHANG Min, LI Bingchang, et al. Effect of drought stress on material transport and grain-filling characteristics of wheat vegetative organs[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(15): 25-31.
- [31] 张凯, 刘战东, 强小嫚, 等. 耕作方式和灌水处理对冬小麦-夏玉米水分利用及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 102-109.
ZHANG Kai, LIU Zhandong, QIANG Xiaoman, et al. Effects of tillage and irrigation on water use and yield of winter wheat and summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(17): 102-109.
- [32] 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 Yue, LI Sien, HU Dan, 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.
- [33] LIU W X, MA G, WANG C Y, et al. Irrigation and nitrogen regimes promote the use of soil water and nitrate nitrogen from deep soil layers by regulating root growth in wheat[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 32.
- [34] LIU W M, HOU P, LIU G Z, et al. Contribution of total dry matter and harvest index to maize grain yield: A multisource data analysis[J]. Food and Energy Security, 2020, 9(4): e256.
- [35] 梁永辉, 王振华, 宋利兵, 等. 基于 CERES-Maize 模型的新疆滴灌玉米灌溉制度优化[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 41-48.
LIANG Yonghui, WANG Zhenhua, SONG Libing, et al. Optimizing drip-irrigation schedule of maize in Xinjiang using the CERES-maize model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 41-48.

Influence of Drip Irrigation on Dry Matter Distribution and Yield Formation of the Grains of Densely Planted Maize

SHI Jingjing^{1,2}, LAN Huiqing^{1,2}, ZHANG Xiangqian^{3,4*}, LU Zhanyuan^{1,3,4*}, BU Hengtong^{1,2},
BAI Dongxing^{1,2}, CHENG Yuchen^{3,4}, DU Xiangyu⁵, WANG Manxiu^{1,2}, CHEN Xuanyi^{1,2}

(1. School of Life Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010020, China; 2. Key Laboratory of Herbage & Endemic Crop Biotechnology, Ministry of Education, Hohhot 010020, China; 3. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 4. Inner Mongolia Key Laboratory of Degradation Farmland Ecological Remediation and Pollution Control, Hohhot 010031, China; 5. Inner Mongolia Mengcao Ecology and Environment (Group) Company Limited, Hohhot 010070, China)

Abstract: 【Objective】The purpose of this paper is to investigate the effect of drip irrigation amount on dry matter accumulation and distribution, as well as the yield formation of the grain machine harvest maize. 【Method】The study was based on the drip irrigation experiment established in 2018 in the Experimental Field of Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences. The experiment consisted of five irrigation treatments by irrigating 415 m³/hm² (W1), 645 m³/hm² (W2), 945 m³/hm² (W3), 1 275 m³/hm² (W4) and 1 605 m³/hm² (W5), respectively. A rain-fed plot was taken as the control (CK). In each treatment, we measured the accumulation and distribution of above-ground dry matter in 2020 and 2021. Logistic model was used to describe the temporal change in dry matter accumulation, from which we further analyze the characteristics of dry matter accumulation and distribution, as well as the relationship of drip irrigation amount and yield under different treatments. 【Result】Irrigation significantly increased the dry matter accumulation in the upper part of the plant; temporal change in the dry matter accumulation is well described by the logistic model, with $R^2 > 0.888$. In 2020 and 2021, the maximum growth rate of the dry matter accumulation increased as the irrigation amount increased, with the increase in the CK being the least and the increase in W5 being the highest. The biological yield in W5 was the highest in both 2020 and 2021; the harvest index in W4 and W3 was the highest, being 0.51 and 0.50 respectively. Compared with CK, irrigation reduced dry matter distribution in the vegetative organs at maturity stage but increased dry matter accumulation in the grains. With the increase in irrigation amount, the economic yield in 2020 first increased, followed by a decline, maximizing in W4, reaching 14 282.42 kg/hm² in 2021. The yield in W4 (15 480.33 kg/hm²) and W5 (15 892.52 kg/hm²) was significantly higher than that in other treatments. 【Conclusion】Optimizing irrigation amount can significantly increase dry matter accumulation in the aboveground part, and promote distribution of dry matter in the grain. In drought years with average annual natural precipitation between 364.2 and 390.7 mm, the optimum drip irrigation amount is 1 275 m³/hm² for grain machine harvest maize (planting density is 7.5×10^4 plants/hm²) in the arid and semi-arid areas in central and western Inner Mongolia.

Key words: drip irrigation amount; grain machine harvest maize; Logistic equation; dry matter allocation and transport; maize yield

责任编辑: 白芳芳