

基于土壤水分下限和作物耗水强度优化玉米阶段灌水量

梁雪, 薛冰, 李芳芳, 崔怡蕊, 马艳桃, 危常州, 姜艳*
(石河子大学, 新疆 石河子 832003)

摘要: 【目的】基于土壤水分下限和作物耗水强度优化玉米阶段灌水量, 为新疆玉米节水增产提供科学指导。【方法】以不同水分梯度下的膜下滴灌玉米为研究对象, 研究新疆高产玉米在不同水分处理下的各生育时期适宜计划湿润层深度、耗水规律、产量及水分利用效率, 建立以土壤水分下限和作物耗水强度优化灌水量的方法。【结果】玉米拔节期适宜计划湿润层深度为 20 cm, 大喇叭口期、抽穗期和灌浆期为 40 cm。660 mm 灌水量下, DH618、XY335 玉米品种的水分利用效率较高且产量显著高于其他灌水处理。基于土壤水分下限和作物耗水强度优化高产玉米阶段灌水量的结果为: DH618 单次灌水量为 51~70 mm, 灌水总量为 649.5 mm; XY335 单次灌水量为 39~67.5 mm, 灌水总量为 629.5 mm。【结论】基于土壤水分下限和作物耗水强度计算灌水量的方法从土壤和作物 2 个方面共同优化玉米阶段灌水量, 更加科学性地分配了各阶段灌水量, 提高了水分利用效率。

关键词: 玉米; 土壤水分; 计划湿润层; 耗水规律; 耗水强度

中图分类号: S513; S274.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2024174

梁雪, 薛冰, 李芳芳, 等. 基于土壤水分下限和作物耗水强度优化玉米阶段灌水量[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 17-24.
LIANG Xue, XUE Bing, LI Fangfang, et al. Optimizing irrigation scheduling for maize based on soil moisture threshold and water consumption intensity[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 17-24.

0 引言

【研究意义】玉米是我国第一大粮食作物, 在耕地面积有限条件下, 提高玉米单位面积产量是解决我国粮食安全的重要途径。灌溉是保证玉米高产、稳产的重要管理措施之一。【研究进展】灌溉量对玉米产量的影响研究大多集中在适宜灌溉量的确定以及灌溉指标研究^[1-3]。其中, 基于土壤水分上、下限确定灌水量是最为常见的方法。土壤水分上限一般为田间持水率 (FC), 而土壤水分下限是防止土壤含水率过低而影响作物产量的水分阈值。此外, 基于土壤水分计算作物灌水量时, 考虑计划湿润层深度是精确计算灌水量的基础, 适宜的湿润层深度是实现作物节水高产的重要因素之一。 FC 是土壤所能稳定保持、对作物有效的最高土壤含水率, 是理想化常数。然而, FC 并不是一个常数, 可以通过田间测定, 但不易再现, 且因测定条件和排水时间的不同, FC 尚无精确的测定方法^[4], 因此, 以 FC 作为土壤水分上、下限估算指标得到的灌水定额

可能存在一定误差; 且没有考虑作物不同时期实际耗水情况也会给实时动态应用带来困难。此外, 由于土壤含水率的测定依靠土壤水分传感器, 而土壤水分传感器在反映作物需水量上可能存在超前或滞后^[5]。【切入点】因此, 基于单一土壤水分指标确定灌水量存在不足, 而结合生育周期内作物耗水强度计算玉米灌水量, 结合土壤水分下限与作物耗水强度共同确定作物阶段灌水量可能是未来准确计算阶段灌水量的潜在途径。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究以新疆膜下滴灌高产玉米为研究对象, 研究不同滴灌量对高产玉米不同生育期根系吸水的主要土层、耗水规律、产量的影响, 结合土壤水分和作物需水特性制定灌溉方案, 优化灌水量。研究结果可为旱区节水、高产高效灌溉模式的制定提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在石河子大学试验场 (44°33'N, 85°99'E) 开展, 该区域属温带大陆性气候, 降水集中在 7—9 月。2023 年作物生育期内降水量 77.7 mm, 月平均气温 20.03 °C, 最高气温 40 °C, 最低温度 3 °C (图 1)。试验地土壤类型为灰漠土, 质地为砂壤土, 0~60 cm 土层平均体积质量为 1.44 g/cm³, 平均田间体积持水率为 31.21%。土壤 pH 值为 7.79, 有机质量为 26.09 g/kg, 前茬作物为花生。

收稿日期: 2024-04-26 修回日期: 2024-09-15

基金项目: 国家农业重大科技项目 (NK2022180801); 高产超高产玉米群体水分诊断与调控研究项目 (SRP2023017)

作者简介: 梁雪 (1999—), 女。硕士研究生, 主要从事农田生态环境研究。E-mail: 1844823969@qq.com

通信作者: 姜艳 (1981—), 女。硕士生导师, 主要从事农林生态系统碳水循环研究。E-mail: jiangyan098@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

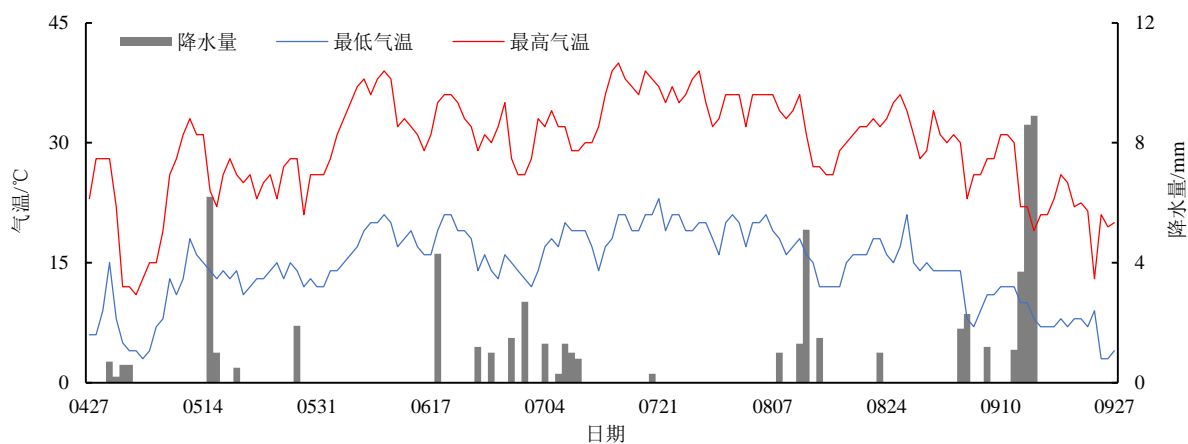


图 1 玉米生育期内降水量及气温变化

Fig.1 Precipitation and temperature during maize growth period

1.2 试验设计

试验于 2023 年 4—9 月进行, 试验设置 2 个高产玉米品种: 登海 618 (DH618) 和先玉 335 (XY335), 播种当天各处理统一滴灌 67.5 mm 出苗水量, 出苗后在每个品种区内设置不同水分梯度。试验以当地高产玉米田的常规滴灌量为对照 (W2, 577.5 mm), 按降低常规滴灌量的 14%, 增加常规滴灌量的 14% 和 28%, 共设置 3 个灌溉水平, 各处理依次为: 577.5 mm (W2, 对照), 495 mm (W1),

660 mm (W3), 742.5 mm (W4) (表 1)。每个处理重复 3 次, 每个重复随机排列, 共设置 24 个小区, 每个小区面积为 90 m², 各小区间均有宽为 1 m 的隔离带以防止水分横向交换。玉米种植模式采用宽 (70 cm)、窄 (40 cm) 行种植, 株距 15 cm, 种植密度为 12 万株/hm²。施肥水平参考当地高产玉米常规施肥水平, 农机农艺配套措施、病虫草害、蹲苗均按照当地农户实施方式进行田间管理。

表 1 各处理单次灌水量及实际灌水日期

Tab.1 Single irrigation volume and actual date of irrigation for each treatment

mm

处理	灌水日期											灌溉量
	0427	0611	0619	0702	0710	0717	0724	0731	0807	0814	0821	
W1	67.5	45	30	45	45	45	52.5	45	45	37.5	37.5	495
W2	67.5	52.5	37.5	52.5	52.5	52.5	60	52.5	52.5	52.5	45	577.5
W3	67.5	60	45	60	60	60	67.5	60	60	67.5	52.5	660
W4	67.5	67.5	52.5	67.5	67.5	67.5	75	67.5	67.5	82.5	60	742.5

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤体积含水率

土壤体积含水率使用德国 IMKO 公司生产的 TRIME-TDR 时域反射仪测定, 测点位于每个小区中心位置。测定时间间隔为 7 d, 在灌水、降水前后及各生育时期 (拔节期 (0610—0626)、大喇叭口期 (0627—0707)、抽穗期 (0708—0729) 灌浆前期 (0730—0902) 和灌浆末期 (0903—0926)) 始末加密观测, 每次测定重复 3 次。每个测点测定 3 个土壤深度, 依次为 0.2、0.4、0.6 m。采用烘干法测定土壤体积含水率对 TDR 数据进行校核。

1.3.2 作物耗水量与耗水强度

参照 Rathore 等^[6]方法计算玉米各生育时期耗水量 (ET , mm)。

耗水强度 (ET_a , mm/d) 为生育阶段耗水量与生育期日数之比。

1.3.3 地上部干物质量

在玉米各生育时期进行田间取样, 每个小区随机选取 3 株长势均匀的玉米, 用剪刀将茎、叶、雄和穗分离, 先在 105 °C 烘箱中杀青 30 min, 然后调至 80 °C 烘干至恒质量, 用电子天平称量地上部干物质量。

1.3.4 产量和水分利用效率测定

参照曹永刚等^[7]方法计算产量和水分利用效率。

1.3.5 单次灌水量优化

1) 基于土壤水分下限的灌水量确定

参照张雨新等^[8]方法计算基于土壤水分下限 (W_i) 的灌水量。 W_i 根据常浩等^[3]和侯琼等^[9]试验以及当地灌水经验确定。高产玉米拔节期、大喇叭口期 W_i 为 80%FC, 经计算本试验拔节期 W_i 为 27.26%, 大喇叭口期 W_i 为 24.85%, 抽穗期、灌浆前期 W_i 为 75%FC, 经计算本试验为 23.29%。

2) 基于土壤水分下限和作物耗水强度的灌水量确定

单次灌水量 (I) 是以土壤水分下限和作物耗水强度来优化灌溉量的方法, 指在满足基于土壤水分下限确定的灌水量的同时, 补给可满足作物正常的

生理、生长活动所消耗的总灌水量, 计算见式 (1), 具体计算流程见图 2。

$$I=M+T \times ET_a, \quad (1)$$

式中: M 为基于土壤水分下限的灌水量 (mm); T 为灌溉周期 (d); ET_a 为耗水强度为 (mm/d)。

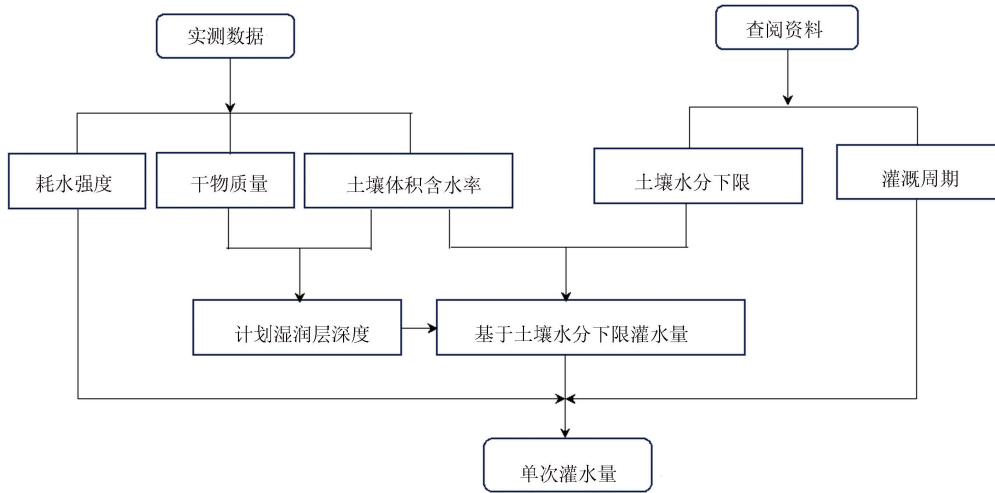


图 2 单次灌水量计算流程

Fig.2 Calculation process of single irrigation volume

1.4 数据分析

采用 SPSS 25.0 和 Excel 2016 软件进行数据处理及绘图。

2 结果与分析

2.1 高产玉米生育阶段计划湿润层深度分析

2.1.1 高产玉米产量与各器官相对干物质质量的相关性

干物质的积累和分配对作物产量有直接影响。为了探究玉米各器官相对干物质对产量的影响, 对其进行皮尔逊相关分析, 详见表 2。DH618 和 XY335 品种的产量与各生育阶段单株玉米相对干物质质量的相关性均在 $P<0.001$ 或 $P<0.01$ 显著水平, 且相关系数在各生育阶段均高于其他器官。

2.1.2 计划湿润层深度

选取与产量相关性最高的单株玉米相对干物质质量与相应阶段不同土层的相对湿度建立回归模型, 明确玉米计划湿润层深度, 如表 3 所示。DH618 和 XY335 在各生育阶段单株玉米相对干物质质量与不同土层土壤相对湿度的关系均为二次函数关系, 其中拔节期相对干物质质量与 20 cm 土层相对湿度的相关性最高 ($R^2>0.93$), 故 20 cm 为拔节期计划湿润层深度; 大喇叭口期、抽穗期和灌浆期相对干物质质量与 40 cm 土层相对湿度相关性最高 ($R^2>0.82$), 故 40 cm 为大喇叭口期、抽穗期和灌浆期的计划湿润层深度。

2.2 高产玉米耗水规律

由 DH618 和 XY335 全生育期每间隔 7 d 的耗水量及累积耗水量的变化趋势可知 (图 3), 随着生育期的推进, 玉米累计耗水量不断增加, 从水分处理开始的拔节期, 各处理累积耗水量始终表现为 W4 处理>W3 处理>W2 处理>W1 处理。各处理玉米耗水量均集中在拔节—灌浆前期 (0610—0902), 其中 DH618 在该阶段的耗水量占全生育期耗水量的 75%~83%, XY335 在该阶段的耗水量占全生育期耗水量的 75%~80%。

玉米各生育阶段耗水强度均随灌溉量的增加而增加 (图 4), 其中 DH618 耗水强度为 3.21~9.85 mm/d, XY335 耗水强度为 3.54~8.45 mm/d。2 个品种各生育时期耗水强度均表现为抽穗期>灌浆前期>大喇叭口期>拔节期>苗期>灌浆后期。

2.3 高产玉米灌溉量分析

DH618 产量在 W1 处理和 W4 处理间无显著差异, 其他处理差异显著, 表现为 W3 处理>W2 处理>W4 处理>W1 处理 (表 4); 水分利用效率随着灌溉量的增加而降低。XY335 产量在各处理间差异显著, 表现为 W3 处理>W2 处理>W4 处理>W1 处理; 水分利用效率随着灌溉量的增加呈先增加后降低的趋势。总的来说, DH618 和 XY335 的产量均在 W3 处理达到最高, 水分利用效率在 W3 处理下也较高。

表 2 高产玉米产量与各器官相对干物质量的相关性

Tab.2 Correlation between yield of high yielding maize and relative dry matter of each organ

品种	生育期	指标	叶	茎	雄蕊	单株玉米	产量	
DH618	拔节期	叶	1					
		茎	0.49	1				
		雄蕊	0.49	0.50	1			
		单株玉米	0.26	0.73*	0.58*	1		
		产量	-0.04	0.53	0.48	0.90***	1	
		指标	叶	茎	雄蕊	穗	单株玉米	产量
	大喇叭口期	叶	1					
		茎	0.52	1				
		雄蕊	0.54	-0.09	1			
		穗	-0.59	0.20	-0.33	1		
		单株玉米	0.82**	0.90***	0.29	-0.08	1	
		产量	0.79**	0.77**	0.23	-0.28	0.87***	1
	抽穗期	叶	1					
		茎	0.60*	1				
		雄蕊	0.34	0.85***	1			
		穗	0.81**	0.56	0.27	1		
		单株玉米	0.69*	0.92***	0.82**	0.60*	1	
		产量	0.47	0.61*	0.52	0.25	0.79**	1
灌浆期	叶	1						
	茎	0.74**	1					
	雄蕊	0.78**	0.82***	1				
	穗	-0.20	-0.07	0.19	1			
	单株玉米	0.89***	0.88***	0.90***	0.08	1		
	产量	0.67*	0.62*	0.63*	0.13	0.82***	1	
XY335	拔节期	指标	叶	茎	雄蕊	单株玉米	产量	
		叶	1					
		茎	0.83***	1				
		雄蕊	-0.44	-0.38	1			
		单株玉米	0.77**	0.80***	-0.24	1		
		产量	0.33	0.56	-0.06	0.81**	1	
	大喇叭口期	叶	1					
		茎	0.84***	1				
		雄蕊	0.09	0.40	1			
		单株玉米	0.84***	0.95***	0.26	1		
		产量	0.63*	0.67*	-0.19	0.82***	1	
		指标	叶	茎	雄蕊	穗	单株玉米	产量
	抽穗期	叶	1					
		茎	0.47	1				
		雄蕊	0.08	0.35	1			
		穗	0.28	-0.12	-0.12	1		
		单株玉米	0.54	0.73**	0.48	-0.38	1	
		产量	0.55	0.64*	0.22	-0.37	0.89***	1
灌浆期	叶	1						
	茎	0.72**	1					
	雄蕊	0.59*	0.59*	1				
	穗	0.31	-0.14	0.04	1			
	单株玉米	0.67*	0.78**	0.21	0.07	1		
	产量	0.72**	0.49	0.19	0.51	0.75**	1	

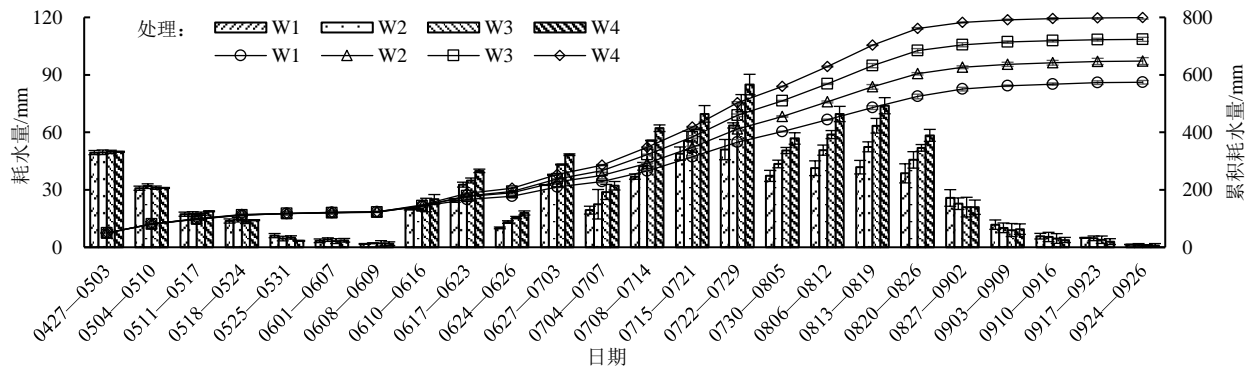
注 ***表示在 $P<0.001$ 水平显著, **表示在 $P<0.01$ 水平显著, *表示在 $P<0.05$ 水平显著。

表 3 不同土层相对湿度与单株玉米相对干物质量的回归分析

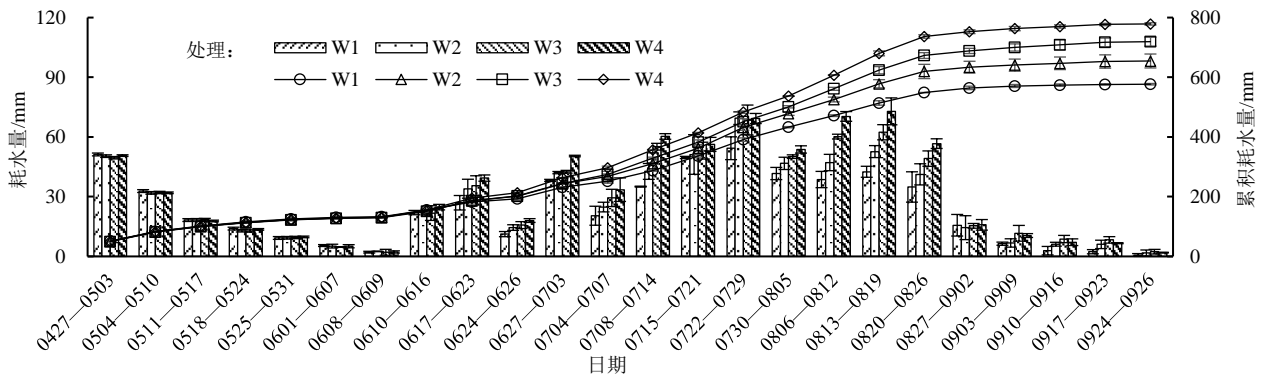
Tab.3 Regression analysis of relative humidity of different soil layers and relative dry matter of maize per plant

生长阶段	土层深度/cm	DH618		XY335	
		方程式	R ²	方程式	R ²
拔节期	0~20	$y = -17.08x^2 + 22.975x - 6.9027$	0.9509	$y = -12.314x^2 + 15.769x - 4.2472$	0.9387
	0~40	$y = -20.923x^2 + 35.372x - 14.183$	0.6834	$y = -372.58x^2 + 658.81x - 290.44$	0.4904
	0~60	$y = -8.1739x^2 + 15.732x - 6.8172$	0.5002	$y = -43.122x^2 + 83.911x - 40.059$	0.8412
大喇叭口期	0~20	$y = -2.4739x^2 + 4.2882x - 1.3932$	0.6983	$y = -0.0666x^2 + 0.1547x + 0.3645$	0.7477
	0~40	$y = -13.846x^2 + 27.057x - 12.755$	0.9612	$y = -0.2005x^2 + 0.4654x + 0.1855$	0.8993
	0~60	$y = -16.109x^2 + 30.426x - 13.905$	0.6383	$y = -0.0544x^2 + 0.206x + 0.2967$	0.7407
抽穗期	0~20	$y = -35.541x^2 + 61.337x - 26.019$	0.5775	$y = -6.4104x^2 + 9.5778x - 3.1704$	0.6912
	0~40	$y = -32.791x^2 + 61.516x - 28.415$	0.8969	$y = -23.588x^2 + 39.932x - 16.493$	0.8223
	0~60	$y = -31.212x^2 + 60.253x - 28.629$	0.6666	$y = -52.178x^2 + 103.05x - 50.473$	0.6496
灌浆期	0~20	$y = -93.009x^2 + 179.87x - 86.462$	0.6431	$y = -1.2358x^2 + 2.3689x - 0.6305$	0.6082
	0~40	$y = -30.332x^2 + 57.765x - 26.984$	0.9219	$y = -5.8688x^2 + 11.304x - 4.9357$	0.8238
	0~60	$y = -40.97x^2 + 79.318x - 37.893$	0.4787	$y = -14.968x^2 + 28.175x - 12.721$	0.6889

注 x 为土壤相对湿度; y 为相对干物质量。



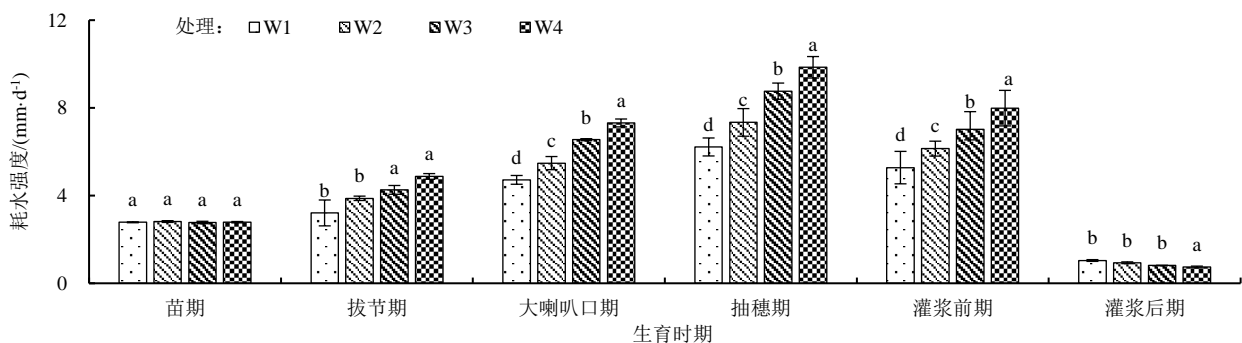
(a) DH618 水分耗散过程



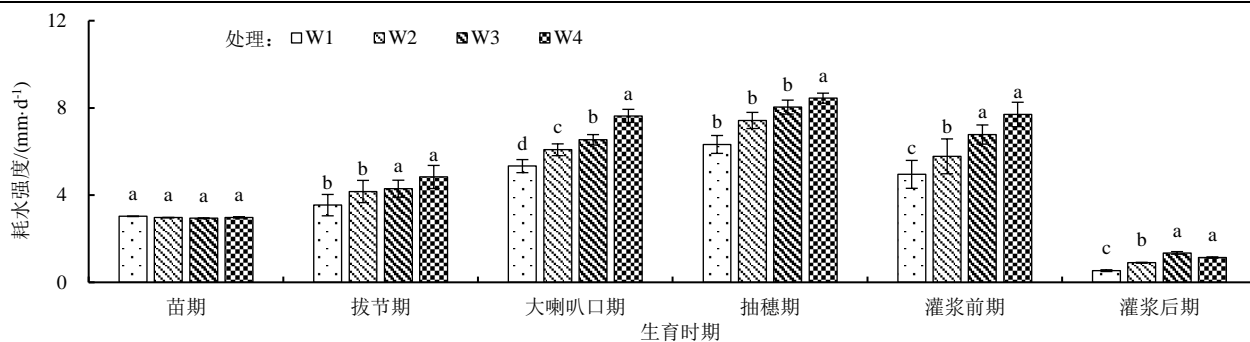
(b) XY335 水分耗散过程

图 3 DH618、XY335 的耗水量及累积耗水量变化

Fig.3 Changes of water consumption and cumulative water consumption of DH618 and XY335



(a) DH618 耗水强度



(b) XY315 耗水强度

图 4 DH618 和 XY335 的耗水强度

Fig.4 Water consumption intensity of DH618 and XY335

表 4 高产玉米产量和水分利用效率

Tab.4 Yield and water use efficiency of high yielding maize

品种	处理	产量/(kg·hm ⁻²)	水分利用效率/(kg·m ⁻³)
DH618	W1	17 011.99c	2.96a
	W2	18 555.28b	2.86ab
	W3	20 280.90a	2.80b
	W4	17 655.61c	2.21c
XY335	W1	16 004.61d	2.76a
	W2	18 085.60b	2.77a
	W3	20 140.82a	2.80a
	W4	17 270.61c	2.22b

2.4 高产玉米灌水量优化

2.4.1 基于土壤水分下限的阶段灌水量 M

拔节期计划湿润层深度为 20 cm，大喇叭口—灌浆期为 40 cm（表 5）。拔节期灌水前的土壤含水率 (W_0) 为实测值，DH618 的 W_0 为 18.63%，XY335 的 W_0 为 17.59%，其他生育时期 W_0 为前 1 个生育阶段的 W_i 。由此可得到各生育阶段在每次灌溉前只考虑土壤水分下限所需的灌水量，见表 5。

表 5 不同品种基于土壤水分下限的灌水量

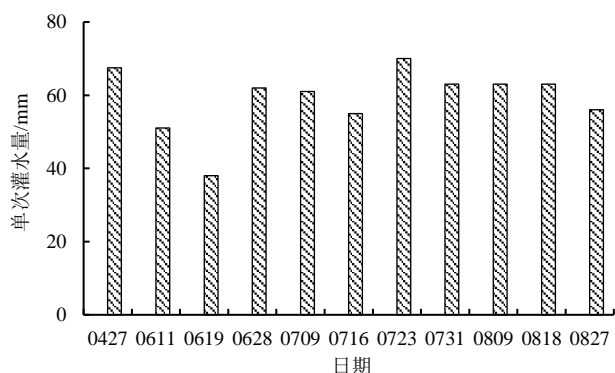
Tab.5 Irrigation volume of different varieties based on lower limit of soil moisture

指标	拔节期	大喇叭口期	抽穗期	灌浆前期
H/cm	20	20	40	40
$W_i/\%$	27.26	27.26	24.85	23.29
DH618	$W_0/\%$	18.63	27.26	24.85
	M/mm	17.26	0	-9.65
XY335	$W_0/\%$	17.59	27.26	24.85
	M/mm	19.34	0	-9.65

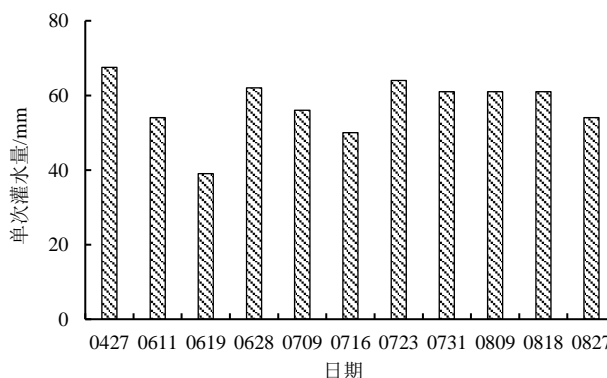
2.4.2 基于土壤水分下限和作物耗水强度的阶段灌水量 I

由 2.3 节分析可知，W3 处理为最佳灌溉量，因此将其对应的 ET_a 作为式 (1) 的输入变量。结合沈东萍^[10]和李菊^[11]研究将 5~12 d 作为 T 的参照，计算

得到 DH618 和 XY335 的基于土壤水分下限和作物耗水强度的各生育时期单次灌水量（图 5）。DH618 全生育期灌水量为 649.5 mm；XY335 全生育期灌水量为 629.5 mm。



(a) DH618 单次灌水量



(b) XY335 单次灌水量

图 5 DH618、XY335 单次灌水量

Fig.5 DH618、XY335 single irrigation water volume

3 讨论

玉米各生育阶段适宜的湿润层深度可使作

物根系在适宜的土壤水分范围内生长，从而保证基本生理活动，确保产量，也有利于精准量化灌溉量，实现高产节水。周始威等^[12]通过在春玉米各生育时

期设置不同计划湿润层深度得到苗期计划湿润层深度为 30 cm, 拔节期为 40 cm, 抽雄一成熟期为 50 cm。本试验利用各阶段相对干物质量与不同土层相对湿度相关性明确玉米计划湿润层深度, 得出拔节期的计划湿润层深度为 20 cm, 大喇叭口期、抽穗期和灌浆期为 40 cm。与张洁等^[13]通过研究不同土层土壤水分变化特征得到的结果一致。此外, 漆栋良等^[14]和周昌明等^[15]研究结果均证明了 0~40 cm 是春玉米根系主要分布土层。

本研究发现, 不同品种玉米耗水量在生育期均表现为前、后期少、中期多的变化趋势, 且在高产玉米各发育阶段, 灌溉定额大的处理耗水量和耗水强度都相对较大, 与前人^[16]研究结果一致。高产玉米较中低产品种玉米耗水量高, 尽管高耗水量是作物高产的前提, 但合理分配各阶段的灌水量, 对水分高效利用尤为重要, 而分配依据是玉米需水关键期。前人研究发现, 拔节期、大喇叭口期、抽穗期和灌浆期是玉米需水关键期^[17-18]。本试验通过较高频的土壤含水率测定, 明确了各生育时期内耗水量的变化趋势。不同水分处理下灌浆后期耗水量均较灌浆前期耗水明显减少, 且这段期间玉米的产量已基本形成。因此, 本试验将玉米需水关键期定为拔节期、大喇叭口期、抽穗期和灌浆前期, 较前人研究有所不同。此外, 在一定范围内, 玉米的产量随着灌溉量的增加而增加, 但超过一定范围后, 玉米的产量会随着灌溉量的增加而下降, 这与前人^[19]研究结果一致。

诊断水分亏缺、寻求适度水分胁迫阈值一直是国内外研究的热点。前人从诊断指标出发, 对作物水分亏缺诊断的研究正在不断深入。土壤水分、蒸腾速率、叶水势等单一表征水分状况的指标在作物灌溉诊断方面存在片面性, 水分诊断应建立在多项指标之上, 其产生的指导作用才会更为客观、实用。因此, 本试验通过土壤与作物两种指标来进行水分诊断, 提出单次灌水量 I 的估算方法。最后通过计算发现基于土壤水分下限和作物耗水特性优化所得的单次灌水量与程雅婷等^[20]研究的玉米高产阶段灌水量结果相似, 说明该公式具有一定的合理性。尽管基于土壤水分下限和作物耗水强度灌水总量与较佳灌溉量差异不大, 但通过此方法却精确量化了各生育时期水量分配, 提高了玉米水分利用效率, 有利于实现高产与节水协同。

4 结 论

1) 高产玉米拔节期计划湿润层深度为 20 cm, 大喇叭口—灌浆期计划湿润层深度为 40 cm。

2) 高产玉米生育期总耗水量和各生育阶段耗水量均随滴灌量的增加而增加; 耗水量呈前期、后期低、中期高的变化趋势; 玉米产量随灌溉量的增加先增加后减少。

3) 以土壤水分下限和作物耗水强度诊断高产玉米灌水量的方法考虑了作物耗水特性, 具有较强的理论可行性和推广性。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] ABIOYE E A, ABIDIN M S Z, MAHMUD M S A, et al. A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 173: 105-441.
- [2] 胡燕哲, 吴明泽, 李涛龙, 等. 玉米生长指标的土壤水分上下限调控机理[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 165-170.
HU Yanzhe, WU Mingze, LI Taolong, et al. Growth indicators of summer corn under irrigation soil moisture upper and lower limit[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 165-170.
- [3] 常浩, 洪明, 陈志卿, 等. 土壤水分上下限对北疆滴灌春玉米产量和品质的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(1): 207-215.
CHANG Hao, HONG Ming, CHEN Zhiqing, et al. Effect of upper and lower soil moisture limits on yield and quality of drip irrigated spring maize in the Northern Xinjiang[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(1): 207-215.
- [4] WU X T, LU G H, WU Z Y, et al. An integration approach for mapping field capacity of China based on multi-source soil datasets[J]. *Water*, 2018, 10(6): 728.
- [5] MANE S, DAS N, SINGH G, et al. Advancements in dielectric soil moisture sensor calibration: A comprehensive review of methods and techniques[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 218: 108-686.
- [6] RATHORE V S, NATHAWAT N S, BHARDWAJ S, et al. Yield, water and nitrogen use efficiencies of sprinkler irrigated wheat grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 187: 232-245.
- [7] 曹永刚, 徐龙龙, 柴强, 等. 水氮减量条件下地膜玉米免耕轮作小麦的水分利用特征[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(14): 2 660-2 672.
CAO Yonggang, XU Longlong, CHAI Qiang, et al. Water use characteristics of wheat rotated after no tillage plastic film mulching maize with reduced water and nitrogen[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(14): 2 660-2 672.
- [8] 张雨新, 张富仓, 邹海洋, 等. 生育期水分调控对河西地区滴灌春小麦生长和水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 171-177.
ZHANG Yuxin, ZHANG Fucang, ZOU Haiyang, et al. Effects of soil water regulation in growing period on spring wheat growth and water use in Hexi areas under drip irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 171-177.
- [9] 侯琼, 李建军, 王海梅, 等. 春玉米适宜土壤水分下限动态指标的确定[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(6): 1-5, 34.
HOU Qiong, LI Jianjun, WANG Haimei, et al. Dynamic indexes of water-saving irrigation based on maize growth characteristics[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(6): 1-5, 34.
- [10] 沈东萍. 灌溉频率对新疆膜下滴灌高产(≥ 15000 kg/hm²)春玉米生长发育及产量效应的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
SHEN Dongping. Effects of irrigation frequency on the growth and yield of spring maize with high yield (≥ 15000 kg/hm²) under drip irrigation and plastic mulching in Xinjiang[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.

- [11] 李菊. 滴灌频率和灌水量对河西地区春玉米生长和水分利用效率的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
LI Ju. Effects of drip irrigation frequency and irrigation amount on the growth and water use efficiency of spring maize in Hexi area[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [12] 周始威, 胡笑涛, 王文娥, 等. 春玉米不同生育期土壤湿润层深度调控的稳产节水效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 125-132.
ZHOU Shiwei, HU Xiaotao, WANG Wen'e, et al. Water-saving and stable yield effects of regulation on soil wetted depth in different growth stage of spring maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(21): 125-132.
- [13] 张洁, 马鹏飞, 吴素利, 等. 浅埋滴灌土壤水分变化特征及作物耗水规律[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 111-118.
ZHANG Jie, MA Pengfei, WU Suli, et al. Study on characteristics of soil water change and law of crop water consumption under shallow buried drip irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 111-118.
- [14] 漆栋良, 胡田田, 吴雪, 等. 适宜灌水施氮方式利于玉米根系生长提高产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 144-149.
QI Dongliang, HU Tiantian, WU Xue, et al. Rational irrigation and nitrogen supply methods improving root growth and yield of maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 144-149.
- [15] 周昌明, 李援农, 银敏华, 等. 连垄全覆盖降解膜集雨种植促进玉米根系生长提高产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 109-117.
ZHOU Changming, LI Yuannong, YIN Minhua, et al. Ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over ridges for rain harvesting improving root growth and yield of maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 109-117.
- [16] 赵经华, 袁如芯, 王金茂, 等. 不同灌水处理对春玉米土壤水分、耗水特征及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(5): 1-7, 15.
ZHAO Jinghua, YUAN Ruxin, WANG Jinmao, et al. Effects of irrigation amount on soil water, water consumption and yield of spring maize in Northwestern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(5): 1-7, 15.
- [17] 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.
- [18] 曾雪梅, 白清俊, 马丽娜, 等. 陕北榆林滴灌春玉米不同生育期适宜土壤水分控制界限研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(S1): 77-84.
ZENG Xuemei, BAI Qingjun, MA Lina, et al. Study on suitable soil water control limit of spring maize under drip irrigation in Yulin of Northern Shaanxi[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(S1): 77-84.
- [19] LI G H, ZHAO B, DONG S T, et al. Controlled-release urea combining with optimal irrigation improved grain yield, nitrogen uptake and growth of maize[J]. Agricultural Water Management, 2020, 227: 105-117.
- [20] 程雅婷, 李荣发, 王克如, 等. 中国春玉米高产纪录的创造与思考[J]. 玉米科学, 2021, 29(2): 56-59.
CHENG Yating, LI Rongfa, WANG Keru, et al. Creation and thinking of China's spring maize high-yield record[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(2): 56-59.

Optimizing irrigation scheduling for maize based on soil moisture threshold and water consumption intensity

LIANG Xue, XUE Bing, LI Fangfang, CUI Yirui, MA Yangtao, WEI Changzhou, JIANG Yan*

(Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: **【Objective】** Maize is a water-intensive crop, and its production in northwestern China heavily depends on irrigation. Optimising irrigation scheduling is hence essential to improving water use efficiency and conserving water resources. This paper proposes a method to optimise irrigation scheduling for maize cultivation in this region.

【Method】 Field experiments were conducted in Xinjiang using mulched drip irrigation and high-yield maize varieties (DH618 and XY335) under varying total irrigation amounts. For each irrigation-amount treatment, the experiments evaluated the suitable depth of the wetting soil layer, water consumption, yield, and water use efficiency of the crops during different growth stages. The optimal irrigation amount and scheduling were determined based on these measurements.

【Result】 For both varieties, the suitable depth of the wetting soil layer was 20 cm at early vegetative growth stage, and 40 cm at late vegetative growth stage, tasseling stage and milk stage. The water use efficiency of both varieties was the highest when total irrigation amount was 660 cm. The optimal irrigation scheduling for the DH618 variety was 51-70 mm in each irrigation with the total irrigation amount being 649.5 mm, while for the XY335 variety, the optimal irrigation was 39-67.5 mm in each irrigation with the total irrigation amount being 629.5 mm. **【Conclusion】** The proposed method, based on soil moisture thresholds and crop water consumption, provides a more scientifically grounded approach to allocate irrigation water across growth stages. It enhances water use efficiency, conserves water resources, and increases maize yield, offering a valuable strategy for sustainable irrigation management in arid regions.

Key words: maize; soil moisture; planned wetted layer; water consumption law; water depletion intensity

责任编辑: 韩洋