

土壤水分上下限对北疆滴灌春玉米产量和品质的影响

常浩^{1,2}, 洪明^{1,2}, 陈志卿³, 兰茜^{1,2}, 高瑞^{1,2}

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要: 为确定滴灌春玉米 (*Zea mays* L.) 各生育期适宜的土壤水分上、下限, 从而为新疆玉米灌溉管理升级提供理论依据, 以“太玉 339”为试材, 采用正交试验设计方法, 在玉米拔节期、扬花-灌浆期、灌浆-成熟期分别设置 3 种水分上、下限 (50% ~ 80% FC, 60% ~ 90% FC, 70% ~ 100% FC, FC 为田间持水量), 共设 9 个处理 ($T_1 \sim T_9$), 分析其对春玉米不同生育阶段的生长指标、产量、品质、水分利用效率 (*WUE*) 的影响。结果表明: 当玉米各生育期土壤水分保持在 50% ~ 80% FC 时, 其株高、地上干物质量、叶面积指数 (*LAI*) 和产量均显著减小, 但会提高水分利用效率 (*WUE*)。总体而言, T_3 处理的产量最高, 为 17 114.51 kg/hm²; T_4 处理的 *WUE* 最高, 为 3.11 kg/m³; 在灌浆-成熟期提高水分上、下限有利于增加玉米粗蛋白、粗脂肪及淀粉的含量, 其中 T_3 处理该 3 个指标均为最高, 分别为 11.02、4.11、69.96 g/100g。以产量、干物质积累量、品质、*WUE* 为指标, 基于熵权法的综合评价表明 T_3 处理最优。综上所述, 新疆北疆地区滴灌春玉米在拔节期、扬花-灌浆期、灌浆-成熟期适宜的土壤水分分别为 50% ~ 70% FC、70% ~ 100% FC、70% ~ 100% FC。

关键词: 土壤水分上、下限; 滴灌; 春玉米; 产量; 品质; 熵权法; 北疆

中图分类号: S275.6; TV93

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0207-09

Effect of upper and lower soil moisture limits on yield and quality of drip irrigated spring maize in the northern Xinjiang

CHANG Hao^{1,2}, HONG Ming^{1,2}, CHEN Zhiqing³, LAN Xi^{1,2}, GAO Rui^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, China)

Abstract: It is necessary to determine the appropriate upper and lower soil moisture limits for drip irrigated spring maize (*Zea mays* L.) at each growth stage to provide a theoretical basis for the upgrading of maize irrigation management in Xinjiang. Cultivar “Taiyu 339” was chosen as the test material, and three upper and lower limits of soil moisture (50% ~ 80% FC, 60% ~ 90% FC, 70% ~ 100% FC, FC is the field capacity) were set at the jointing stage, flowering-filling stage and filling-maturity stage of maize respectively and nine treatments were established to analyze the effect of different moisture contents on the growth indicators, yield, quality and water use efficiency (*WUE*) of spring maize using the orthogonal experimental design method. The results showed that the plant height, aboveground dry matter mass, leaf area index (*LAI*) and yield decreased significantly when the soil moisture content was maintained at 50% ~ 80% FC in each growth period, but water use efficiency increased. In general, the yield of T_3 treatment was the highest, which was 17,114.51 kg/hm²; T_4 treatment had the highest *WUE*, 3.11 kg/m³. Furthermore, Increasing the upper and lower limits of soil moisture content during the filling-maturity period was beneficial to increasing the content of crude protein, crude fat and starch in maize, a-

收稿日期: 2022-10-15; 修回日期: 2022-11-15

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目 (2020A01003-2、2022B02011-1); 新疆水利科技专项资金项目 (XSKJ-2022); 新疆维吾尔自治区教育厅创新项目 (XJEDU2017T004)

作者简介: 常浩 (1998-), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为农业水资源高效利用。

通讯作者: 洪明 (1980-), 男, 新疆玛纳斯人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。

mong which, the indexes of T_3 treatment scored the highest, which were 11.02, 4.11 and 69.96 g/100g, respectively. Taking yield, dry matter accumulation, quality and WUE as indicators, the comprehensive evaluation based on entropy weight method showed that T_3 was the optimal treatment. In summary, the recommended appropriate soil moisture for drip irrigated spring maize in the northern Xinjiang at the jointing stage, flowering – filling stage, and filling – maturity stage is 50% ~ 70% FC , 70% ~ 100% FC , and 70% ~ 100% FC , respectively.

Key words: upper and lower limits of soil moisture; drip irrigation; spring maize; yield; quality; entropy weight method; the northern Xinjiang

1 研究背景

玉米是我国产量最大的粮食作物,在保障国家粮食安全方面具有战略性意义^[1]。新疆维吾尔自治区(以下简称新疆)属于温带大陆性气候,光照充足、昼夜气温差较大,是我国玉米生产潜力最大的地区^[2]。2021 年新疆农业用水量为 $526.72 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占新疆用水总量的 92.05%^[3],水资源总量不足和农业灌溉用水效率低仍旧是制约新疆农业发展的主要问题。1996 年膜下滴灌技术在新疆被研发成功,因其具有促进节水灌溉和作物高产的特点,所以在棉花、玉米等作物种植中被广泛应用,现已成为新疆应用最为普遍的灌溉技术^[4],截至 2021 年底,新疆滴灌技术应用总面积已达 $398.21 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[5],基于膜下滴灌的水肥一体化技术在大幅提升新疆玉米产量的同时,还提高了水分利用效率,为新疆粮食的稳定供给发挥了重要作用^[6]。在当前以滴灌为主要灌水技术的灌溉管理条件下,国内外学者普遍认为智慧灌溉是实现进一步提升水分生产效率的重要途径之一。近年来,随着物联网及网络通讯技术的快速发展,智慧灌溉实现了从理论研究向大田应用的转化,使新疆玉米生产从传统滴灌技术向智能灌溉升级成为可能^[7]。在灌溉管理方面,精准的灌溉决策是玉米灌溉管理从常规滴灌向智慧灌溉升级过程中亟待解决的关键问题之一。其中,基于土壤水分的灌溉决策应用最为广泛,已然成为众多学者关注的热点^[8]。因此本文开展了滴灌玉米主要生育期适宜的土壤水分上、下限研究,以期为实现新疆玉米生产从传统滴灌向智慧灌溉升级提供一定的理论依据。

水分下限是植物需水的临界值,水分上限是复水时土壤含水率的临界值,国内外学者对玉米的灌水下限开展了大量的研究。郑国玉等^[9]有关北疆春玉米水分下限的研究表明,拔节期为 60% FC (field capacity,田间持水量),扬花 – 灌浆期为 90% FC ,灌浆 – 完熟期为 70% FC 可以实现玉米高产;侯琰等^[10]对内蒙古地区春玉米水分下限进行了研究,

结果表明拔节期、抽雄 – 乳熟期和乳熟 – 成熟期分别为 75% FC 、65% FC 和 60% FC ;Sinclair 等^[11]研究表明,当玉米受到水分胁迫时会降低其叶片的气孔导度,从而降低玉米的水分利用效率。此外国内外学者对滴灌条件下水分下限对作物品质等指标的影响也做了大量的研究^[12-15]。董智强等^[16]研究结果表明,玉米水分下限苗期为 62% ~ 91% FC 、扬花期为 66% ~ 92% FC 、穗期为 68% ~ 94% FC 有助于其高产;马锦良等^[17]研究发现,当玉米苗期和拔节期土壤水分在 65% FC 下限时,其株高、叶面积指数和干物质积累量均高于其他水分处理;宋利兵等^[18]的研究表明,玉米在苗期 – 拔节期受旱而导致的叶面积指数减小幅度比其他生育期受旱更为明显;漆栋良等^[19]通过研究认为玉米的土壤水分调控应集中在土层深度 0 ~ 40 cm 范围内。

土壤水分监测技术影响着作物适宜土壤水分上、下限的相关研究进程,本文以春玉米为试材,采用能够实时监测并传输数据的土壤水分自动监测装置,开展新疆地区北疆滴灌春玉米各生育期适宜的土壤水分上、下限研究,以期为实现精准灌溉和智能化灌溉提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 试验地概况

试验于 2021 年 5 – 10 月在克拉玛依市综合农业开发区进行。试验点地理坐标为 $84^{\circ}55'E$ 、 $45^{\circ}27'N$,平均海拔为 275 m,平均坡降为 0.26‰。试验区多年平均降雨量为 109.4 mm,且集中在 5 – 8 月,多年潜在蒸发量为 3 008.9 mm (20 cm 蒸发皿),最高气温达 $44.1^{\circ}C$,最低气温为 $-35.9^{\circ}C$,冻土深度可达 163.4 cm。试验区春秋时间短,冬冷夏热,夏季光照强,有效积温 (大于 $10^{\circ}C$) 达到 3 968.1 $^{\circ}C$;春秋季多风,最大瞬时风速可达 42.1 m/s。试验地土壤为砂壤土,0 ~ 60 cm 土壤的主要理化性质及肥力状况见表 1。试验地灌溉用水引自克拉玛依市西郊水库,通过管网输送至田间。

表 1 试验地块 0~60 cm 土壤的主要理化性质及肥力状况

土层深度/ cm	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	全氮量/ (g·kg ⁻¹)	全磷量/ (g·kg ⁻¹)	全钾量/ (g·kg ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	田间持 水率/%
0~20	6.98	13.44	7.87	120.21	43.23	0.50	0.92	21.43	1.21	36.12
20~40	6.90	11.66	6.64	110.85	20.44	0.39	0.79	21.93	1.45	31.23
40~60	6.92	7.48	4.22	83.98	31.00	0.41	0.92	18.01	1.42	28.36

2.2 试验材料

供试玉米品种为“太玉 339”,于 2021 年 4 月 26 日种植,窄行距为 40 cm,宽行距为 60 cm,株距为 18 cm,滴灌带间距为 100 cm,滴头间距为 30 cm,滴头流量为 2.3 L/h。试验地春玉米种植模式及土壤水分测位点布置见图 1。

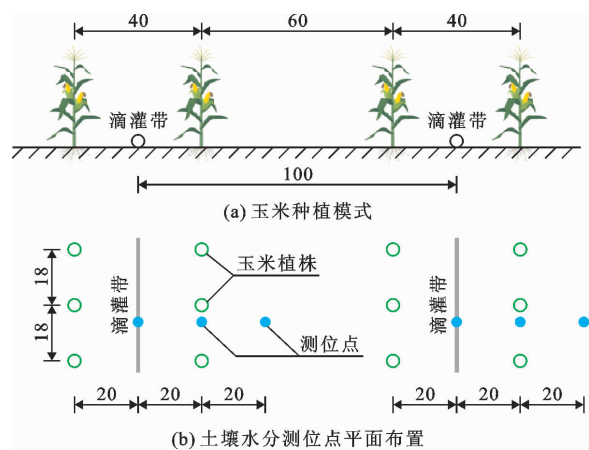


图 1 试验地春玉米种植模式及土壤水分测位点布置(单位:cm)

2.3 试验设计

本研究采用正交试验设计,将春玉米 3 个生育期(拔节期、扬花-灌浆期、灌浆-完熟期)看作 3 个因素,每个生育期土壤水分上、下限设 3 个水平,即 50%~80% FC、60%~90% FC、70%~100% FC,试验共设 9 个处理(表 2)。为减小试验误差,每个处理设 3 个重复,所有试验小区随机布设,小区间设置隔离带以防止可能的水分横向交换。

2.4 各指标的测定及计算方法

(1)土壤水分。土壤水分采用两种方法监测:采用建大仁科 TDR-200 土壤水分传感器对土壤水分调控的土壤含水率实施自动监测,传感器布设在玉米茎秆基部地面以下 25 cm 处,每个小区布设一个。为减小因土壤空间变异造成的测量误差,试验期间将水分传感器测得的土壤含水率与该点 0~60 cm 深度土壤平均含水率进行了拟合。由于布设的传感器只能测定一个固定位置的土壤含水量,为了弥补土壤水分传感器数量的不足,在每个小区再布设 3 根水分探管

并采用 Diviner 2000 土壤水分廓线仪于灌水前、后测定 0~120 cm 深度的土壤水分,用于玉米耗水量的计算,水分探管测位点的具体布设位置见图 1。

表 2 正交试验春玉米 3 个生育期各处理土壤水分上、下限占田间持水量(FC)的比例 %

处理	生育期		
	拔节期	扬花-灌浆期	灌浆-完熟期
T ₁	50~80	50~80	50~80
T ₂	50~80	60~90	60~90
T ₃	50~80	70~100	70~100
T ₄	60~90	50~80	60~90
T ₅	60~90	60~90	70~100
T ₆	60~90	70~100	50~80
T ₇	70~100	50~80	70~100
T ₈	70~100	60~90	50~80
T ₉	70~100	70~100	60~90

(2)玉米生长指标测定。待玉米出苗整齐后,在每个试验小区标记 5 株玉米进行生长指标测定,采用直尺测定株高;采用长宽系数法^[20]计算叶面积指数(leaf area index, LAI),计算方法见公式(1)。以上指标每隔 7 d 测定一次。

$$LAI = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (H_i \cdot J_i \cdot K \cdot G_r)}{S}$$

(1)

式中: n 为玉米株数; m 为玉米植株的全部叶数; H_i 为玉米第 i 片叶片最大宽度,cm; J_i 为玉米第 i 片叶片长度,cm; K 为校正系数,取 $K = 0.75$; G_r 为种植密度,株/m²; S 为换算系数,取 $S = 10\,000$ 。

(3)地上干物质积累量。每隔 14 d 在每个试验小区取 3 株植株(玉米距基部 2 cm 以上的地上茎秆),放入 75 ℃烘箱内烘干至恒重后称量。

(4)产量指标。收获时,从各试验小区取 15 株玉米,室内脱粒前测定穗数及行、列数,脱粒后测定穗长、穗径、百粒重等,称量烘干至恒重的玉米籽粒并折算籽粒产量(14% 含水率)。

(5) 玉米品质指标。在玉米收获后,每个处理随机选取 3 组试样研磨后过筛,采用酸水解法^[21]测定淀粉含量,采用凯式定氮法^[22]测定粗蛋白含量,采用索氏抽提法^[23]测定粗脂肪含量。

(6) 耗水量计算。玉米的耗水量(ET_{ai})利用水量平衡法计算:

$$ET_{ai} = 10 \sum_{i=1}^m r_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + M + P + K \quad (2)$$

式中: ET_{ai} 为玉米各生育期阶段耗水量,mm; i 为试验区各土层的编号; m 为试验区土层总数; r_i 为第 i 层的土壤容重, g/cm^3 ; H_i 为试验区第 i 层土层的厚度,cm; θ_{i1} 、 θ_{i2} 分别为试验区第 i 层土层灌水前、后的含水率; M 为玉米的灌水量,mm; P 为玉米灌水前至灌水后时段内的有效降雨量,mm; K 为试验区时段内地下水补给量,mm,因地下水埋深在 3 m 以下,故 K 可忽略不计; 10 为单位换算系数。

(7) 水分利用效率计算。水分利用效率(water use efficiency, WUE) 采用下式计算:

$$WUE = \frac{Y}{k \cdot ET} \quad (3)$$

式中: WUE 为水分利用效率, kg/m^3 ; Y 为试验地玉米的籽粒产量, kg/hm^2 ; ET 为玉米全生育期耗水量,mm; k 为换算系数,取 $k = 10$,即 $1 m^3/hm^2 = 10 mm$ 。

(8) 熵权法。熵权法是结合熵值信息来确定权重值的研究方法^[24],某个指标的信息熵值 e 越小,则信息效用值 d 越小,因而权重也越大,计算方法如公式(4)和(5)所示。

$$e_j = -\frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^N (1 - e_j)} \quad (5)$$

式中: P_{ij} 为玉米第 i 个处理的第 j 个指标值占全部 j 个指标值之和的比重, $P_{ij} \in [0,1]$; N 为玉米测定指标个数, e_j 为玉米第 j 个指标的信息熵值, $e_j \in [0,1]$; W_j 为玉米第 j 个指标的权重值, $W_j \in [0,1]$ 。

2.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2019 进行数据的基础分析,利用 SPSS20.0 进行单因素方差分析,采用 Duncan's 新复极差检验法进行显著性分析 ($P < 0.05$),采用 Origin9.1 作图。

3 结果与分析

3.1 各处理对玉米各生育期生长指标的影响

各水分上、下限处理对玉米株高、干物质积累量和叶面积指数 LAI 的影响如图 2 所示。

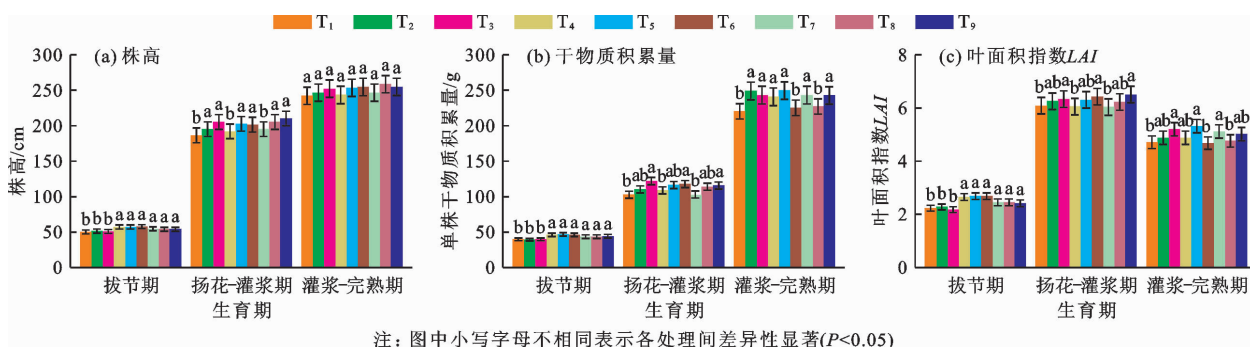


图2 不同水分上、下限处理对玉米各生育期株高、干物质积累量、 LAI 的影响

由图 2 可知,各处理株高均呈现拔节期-灌浆期前快速生长、灌浆-完熟期增长缓慢直至停止的趋势;各处理干物质积累量均呈现拔节-灌浆期前增长缓慢,之后快速增长的趋势;叶面积指数均呈现在拔节-灌浆期前快速增长,在灌浆期达到峰值之后逐渐降低的趋势。不同水分处理除在灌浆-完熟期的株高之间差异不显著外,各生育期 50%~80% FC 与 70%~100% FC 处理的生长指标均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。对玉米各生育期不同水分处理下生长指标的差异性分析如下。

(1) 拔节期:各水分处理的株高、干物质积累量

和叶面积指数大小顺序均为 $T_4 \sim T_6 > T_7 \sim T_9 > T_1 \sim T_3$,各生长指标之间均表现为 $T_1 \sim T_3$ 处理与 $T_4 \sim T_6$ 、 $T_7 \sim T_9$ 处理差异性显著 ($P < 0.05$), $T_4 \sim T_6$ 处理与 $T_7 \sim T_9$ 处理之间不存在显著性差异,并且同一水分上、下限的各处理之间不存在显著性差异。与 50%~80% FC 处理相比,60%~90% FC 、70%~100% FC 处理的株高分别提高了 9.1%~13.3% 和 7.5%~9.5% (图 2(a))、干物质积累量分别增加了 4.5%~7.4% 和 6.8%~12.1% (图 2(b))、 LAI 分别增大了 4.9%~6.3% 和 4.2%~5.4% (图 2(c))。随着水分下限的提高,玉米株高、干物质积

累量和 LAI 均先增大后略微减小,60%~90% FC 处理的各生长指标均高于其他处理。上述试验结果表明,拔节期保持土壤水分在 60%~90% FC 及以上,有利于玉米营养生长,其原因可能是适当降低水分下限有助于玉米根系向深处生长,促进根系吸水,从而有利于其生长发育,因此玉米在拔节期适宜的土壤水分上、下限为 60%~90% FC 。

(2) 扬花-灌浆期:该生育期 T_1 、 T_4 、 T_7 处理的株高与其他 6 个处理呈显著性差异 ($P < 0.05$) (图 2(a)),干物质积累量和 LAI 均表现为 T_1 、 T_4 、 T_7 处理与 T_3 、 T_6 、 T_9 处理呈显著性差异 ($P < 0.05$),但与 T_2 、 T_5 、 T_8 处理差异性不显著 (图 2(b)、图 2(c))。生长指标由高到低的各处理顺序均为 $T_9 > T_6 > T_3 > T_8 > T_5 > T_2 > T_7 > T_4 > T_1$,同一水分上、下限的各处理之间差异性不显著。与 50%~80% FC 处理相比,60%~90% FC 、70%~100% FC 处理的株高分别提高了 8.3%~9.3% 和 5.4%~10.2% (图 2(a))、干物质积累量分别增加了 5.8%~7.3% 和 5.3%~15.3% (图 2(b))、 LAI 分别增大了 3.7%~6.8% 和 6.2%~8.1% (图 2(c))。随着水分下限的提高,玉米各生长指标均逐渐增大。研究表明该生育期是玉米营养生长的关键时期,各处理株高和 LAI 均明显提高,控制土壤水分上、下限为 70%~100% FC 有助于玉米生长,其原因可能是该阶段植株营养生长较其他生育期更为旺盛,作物需水量较大,使土壤保持较高的含水量可促进根系吸水,玉米植株生长发育更好。因此玉米在扬花-灌浆期适宜的土壤水分上、下限为 70%~100% FC 。

(3) 灌浆-完熟期:该生育期各处理株高之间无显著性差异 (图 2(a)),干物质积累量方面 T_1 、 T_6 、 T_8 处理与其他 6 个处理差异性显著 ($P < 0.05$) (图 2(b)), LAI 方面 T_1 、 T_6 、 T_8 处理与 T_3 、 T_5 、 T_7 处理差异性显著 ($P < 0.05$) (图 2(c))。 T_5 处理的干物质积累量最高,单株为 250.71 g,较 T_1 、 T_6 、 T_8 处理分别提高了 13.7%、12.1%、11.3%, T_1 处理的干物质积累量最小,单株为 220.35 g; T_5 处理的 LAI 最大(5.31),较 T_1 、 T_6 、 T_8 处理分别提高了 12.5%、13.4%、11.5%, T_1 处理的 LAI 最小(4.72)。随着水分下限的提高,干物质积累量逐渐增大, LAI 降幅更小。该生育期玉米营养发育完全,生殖生长旺盛,各处理干物质积累量明显提高,试验表明,该生育期土壤水分上、下限为 50%~80% FC 会明显抑制玉米的生殖生长,土壤水分保持在 70%~100% FC 有利于其生殖生长,其原因可能是土壤含水率相对较

高时,可减缓叶片衰老,使光合作用时间延长从而产生更多的生物量。因此玉米在灌浆-完熟期适宜的土壤水分上、下限为 70%~100% FC 。

3.2 各处理对玉米产量的影响

各水分处理的玉米产量及穗部性状构成如表 3 所示。由表 3 可知,百粒重指标 T_1 处理与其他所有处理之间存在显著性差异 ($P < 0.05$),且 T_5 、 T_8 、 T_9 处理与 T_1 、 T_3 处理差异性显著 ($P < 0.05$);产量指标 T_1 处理与其他处理差异性显著 ($P < 0.05$);各处理玉米的穗长、穗径、穗行数、穗列数无显著性差异,该 4 个指标的最大值分别为 T_3 (15.40 cm)、 T_6 (4.69 cm)、 T_3 (32.52) 和 T_7 (14.42) 处理。 T_5 、 T_8 、 T_9 处理的百粒重较最高百粒重 T_3 处理 (36.98 g) 分别减小了 7.5%、7.8%、8.1%,较最低百粒重 T_1 处理 (33.28 g) 分别提高了 3.5%、2.7%、2.4%, T_3 处理的百粒重较 T_1 处理提高了 11.2%。各处理中最高产量为 T_3 (17 114.51 kg/hm²),其次为 T_9 (16 671.74 kg/hm²),二者较最低产量 T_1 处理 (13 772.32 kg/hm²) 分别提高了 24.3% 和 21.1%。通过分析认为,作物在灌浆-完熟期需水量较大,当土壤水分为 50%~80% FC 时,土壤含水率较低,玉米受到水分胁迫的影响,根系吸收水分困难,进而影响玉米果穗的发育,导致玉米穗粒偏小,若各生育期土壤水分均保持在 50%~80% FC 则会明显降低玉米产量,灌浆-完熟期水分上、下限保持在 60%~90% FC 及以上更有助于提高玉米产量。综上所述,若以产量最优为目标,玉米在拔节期可降低水分上、下限为 50%~80% FC 、扬花-灌浆期和灌浆-完熟期均保持在 70%~100% FC 更有利于玉米高产。

3.3 各处理对玉米水分利用效率的影响

通过试验得出不同水分处理对玉米灌水量、耗水量和水分利用效率 (WUE) 的影响,如图 3 所示。

图 3(a) 中各水分处理的灌水量在 387.21~561.75 mm 之间,各处理按灌水量由大到小排序为 $T_9 > T_5 > T_3 > T_7 > T_6 > T_8 > T_2 > T_4 > T_1$ 。 T_1 处理与除 T_4 处理之外的其他 7 个处理存在显著性差异 ($P < 0.05$),其灌水量相较最高灌水量 T_9 处理 (561.75 mm) 减少了 31.1%; T_2 、 T_8 处理与除 T_4 之外的其他 6 个处理存在显著性差异 ($P < 0.05$),灌水量分别较 T_9 处理减少了 17.8%、16.0%。

图 3(b) 中各水分处理的玉米全生育期总耗水量在 441.42~681.62 mm 之间,各处理按耗水量由高到低排序为 $T_9 > T_5 > T_3 > T_7 > T_6 > T_8 > T_4 > T_2 > T_1$, T_1 处理的耗水量最低 (441.42 mm),与所有其他处理存在显著性差异 ($P < 0.05$),较耗水量最高的

T_9 处理(681.62 mm)减少了 35.2%; T_2 、 T_4 、 T_8 处理与除 T_6 处理之外的其他 5 个处理均存在显著性差异($P < 0.05$), 耗水量分别较 T_9 处理减少了 26.8%、26.3%、25.5%。

图 3(c) 中各水分处理的玉米 WUE 在 2.45 ~ 3.11 kg/m^3 之间, 各处理按 WUE 由高到低排序为 $T_4 > T_1 > T_2 > T_3 > T_6 > T_8 > T_5 > T_7 > T_9$ 。其中 T_5 、 T_7 、 T_9 处理相比其他 6 个处理均存在显著性差异($P < 0.05$), WUE 最高的 T_4 处理(3.11 kg/m^3)较这 3 个处理分别提高了 18.7%、21.3%、27.1%。试验结果表明, 各处理随着耗水量的逐渐增大, WUE 则

先增大后降低, 与产量随着耗水量的提高先增大后减少相对应。研究发现, 在拔节期和扬花-灌浆期提高水分上、下限以及在灌浆-成熟期降低水分上、下限, 均会增大玉米的耗水量, 同时玉米产量又较低, 从而导致 WUE 降低, 并且当耗水总量为 441.14 ~ 590.12 mm 时会提高 WUE, 耗水总量超过该范围反而会降低 WUE。

3.4 各处理对玉米品质指标的影响

对收获后各处理的玉米品质进行测定, 测定指标包括淀粉含量、粗蛋白含量、粗脂肪含量, 结果如图 4 所示。

表 3 不同水分处理对玉米穗部性状和产量的影响

处理	穗长/cm	穗径/cm	穗行数	穗列数	百粒重/g	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
T_1	13.98 ± 0.86a	4.30 ± 0.13a	29.30 ± 2.35a	13.52 ± 0.73a	33.28 ± 1.63c	13772.32 ± 0.53b
T_2	14.92 ± 0.63a	4.41 ± 0.17a	29.97 ± 0.61a	14.00 ± 0.26a	35.78 ± 1.71ab	15131.21 ± 0.96a
T_3	15.40 ± 1.27a	4.38 ± 0.03a	32.52 ± 3.92a	13.74 ± 0.40a	36.98 ± 2.88a	17114.51 ± 2.11a
T_4	14.27 ± 0.86a	4.43 ± 0.08a	31.22 ± 1.20a	14.24 ± 0.80a	35.04 ± 1.18ab	15623.41 ± 1.30a
T_5	14.67 ± 0.39a	4.26 ± 0.04a	27.84 ± 1.02a	14.27 ± 0.15a	34.14 ± 1.26b	14831.63 ± 1.13a
T_6	15.18 ± 1.57a	4.69 ± 0.56a	30.18 ± 2.99a	14.22 ± 0.44a	34.77 ± 1.67ab	15825.41 ± 1.38a
T_7	14.54 ± 0.95a	4.47 ± 0.06a	27.00 ± 1.06a	14.42 ± 0.32a	34.93 ± 2.84ab	14163.42 ± 1.57a
T_8	14.56 ± 0.34a	4.32 ± 0.23a	27.35 ± 1.34a	14.26 ± 0.65a	34.19 ± 1.51b	14136.22 ± 1.93a
T_9	14.93 ± 0.35a	4.18 ± 0.11a	29.22 ± 1.70a	14.37 ± 0.39a	34.11 ± 2.11b	16671.74 ± 3.17a

注: 表中数据为所取玉米样本测定后的平均值; 小写字母不相同表示各处理间差异性显著($P < 0.05$)。

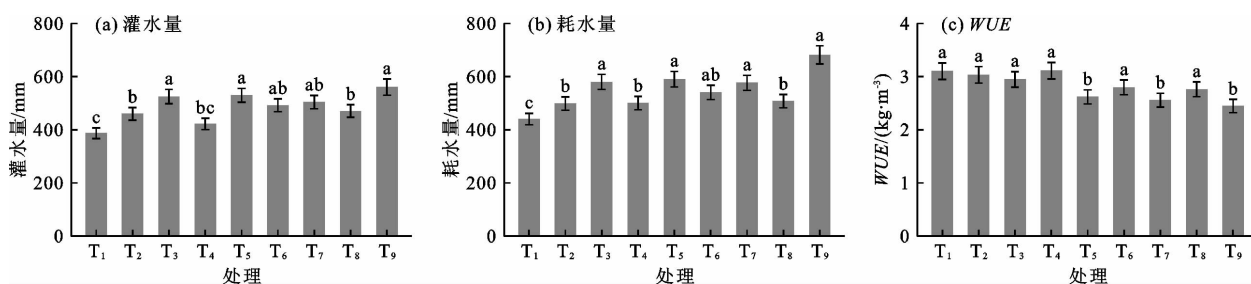


图 3 不同水分处理对玉米灌水量、耗水量和 WUE 的影响

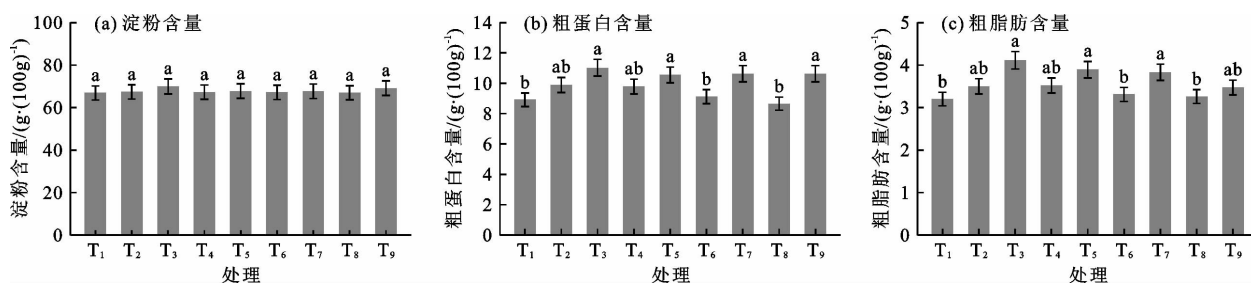


图 4 不同水分处理对玉米淀粉、粗蛋白、粗脂肪含量的影响

(1) 淀粉含量。图 4(a) 中各水分处理的玉米淀粉含量之间无显著性差异, 由高到低的排序为

$T_3 > T_9 > T_5 > T_7 > T_2 > T_4 > T_6 > T_8 > T_1$, 淀粉含量最高的为 T_3 处理(69.96 $\text{g}/100\text{g}$), 其次为 T_9 处理

(69.12 g/100g),两者分别较淀粉含量最低的 T_1 处理(65.58 g/100g)提高了 6.7%、5.4%。随耗水量的提高,玉米淀粉含量也逐渐增加。研究发现,在拔节期和扬花-灌浆期均保持水分上、下限为 60%~90% FC、在灌浆期-完熟期保持在 70%~100% FC 对提高玉米籽粒淀粉含量有益但影响不明显。

(2)粗蛋白含量。从图 4(b)中不同水分处理对玉米粗蛋白含量的影响来看, T_1 、 T_6 、 T_8 处理与 T_3 、 T_5 、 T_7 、 T_9 处理之间差异性显著($P<0.05$),但与 T_2 、 T_4 处理差异性不显著, T_3 、 T_5 、 T_7 、 T_9 处理的粗蛋白含量较 T_1 、 T_6 、 T_8 处理提高了 15.7%~27.3%,同一水分处理的玉米粗蛋白含量差异不大。各处理按粗蛋白含量由高到低的顺序为 $T_3>T_7=T_9>T_5>T_2>T_4>T_6>T_1>T_8$,粗蛋白质含量最高的为 T_3 处理(11.02 g/100g),较 T_1 、 T_6 、 T_8 处理分别提高了 23.7%、20.8%、27.3%,较 T_2 、 T_4 处理分别提高 11.4%、12.7%,粗蛋白质含量最低的为 T_8 处理(8.66 g/100g)。试验表明,灌浆-完熟期保持水分上、下限为 70%~100% FC 有助于提高玉米粗蛋白质的含量,其原因可能是较高的土壤含水率延缓了玉米的收获期,使叶片光合作用产生更多的产物向籽粒转运^[25],从而提高了玉米的蛋白质含量。

(3)粗脂肪含量。从图 4(c)中不同水分处理对玉米粗脂肪含量的影响来看, T_1 、 T_6 、 T_8 处理与 T_3 、 T_5 、 T_7 处理之间差异性显著($P<0.05$),但与 T_2 、 T_4 、 T_9 处理之间差异性不显著,同一水分上、下

限处理之间差异不大。各处理按脂肪白含量由高到低的顺序为 $T_3>T_5>T_7>T_4>T_2>T_9>T_6>T_8>T_1$,粗脂肪含量最高的为 T_3 处理(4.11 g/100g),较 T_2 、 T_4 、 T_9 处理分别提高了 17.4%、16.8%、18.4%,较 T_1 、 T_6 、 T_8 处理分别提高了 28.4%、24.2%、26.1%,粗脂肪含量最低的为 T_1 处理(3.20 g/100g)。试验表明,拔节期适当降低灌水下限、扬花-灌浆期和灌浆-完熟期保持水分上、下限为 70%~100% FC 有助于玉米粗脂肪含量的提高,其原因与粗蛋白含量的分析类似。当灌水量逐渐增大时,玉米粗脂肪含量先增加后逐渐降低,可能是籽粒水分过高会增加玉米脂肪酸含量,导致脂肪容易发生氧化^[26],从而降低了玉米脂肪的积累。

3.5 不同水分上、下限处理方案的综合评价

为了更加全面系统地反映不同水分上、下限对玉米产量、品质、干物质积累量和 WUE 的影响情况,减少单个指标评价灌水效应的局限性,对各处理方案所测得的 6 个评价指标进行了熵权法分析,结果如表 4 所示。表 4 中根据熵权法将产量、干物质积累量、淀粉、粗蛋白、粗脂肪、WUE 依次定义为 $Y_1\sim Y_6$,其信息熵分别为 0.63、0.94、0.93、0.89、0.91、0.88,分析权重占比可以得出综合权重最高的指标为 Y_1 (0.44),其次为 Y_6 (0.15)。分析结果表明,各处理最终得分最高的为 T_3 处理(0.62),其次为 T_9 处理(0.58),得分最低的为 T_8 处理(0.16)。综上所述,综合评价得出的最优处理方案为 T_3 处理。

表 4 各处理方案评价指标的标准化值、信息熵及权重

指标	各处理方案评价指标标准化值									信息熵	权重
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9		
Y_1	0	0.12	0.33	0.12	0.30	0.20	0.27	0.14	0.49	0.63	0.44
Y_2	0.89	0.92	0.76	1.00	0.40	0.83	0.43	0.71	0.56	0.94	0.08
Y_3	0.49	0.56	1.00	0.77	0.54	0.45	0.41	0.37	0.35	0.93	0.09
Y_4	0.62	0.50	0.95	0.45	0.10	0.70	0.80	0	1.00	0.89	0.13
Y_5	0.83	0.30	0.72	0.32	0.22	0.62	0.53	0	1.00	0.91	0.11
Y_6	0.29	0.39	0.62	0.38	0.30	0.46	0.37	0.16	0.58	0.88	0.15
得分	0.29	0.35	0.62	0.38	0.31	0.46	0.37	0.16	0.58		
排序	8	6	1	4	7	3	5	9	2		

4 讨 论

玉米株高、叶面积指数、干物质积累量等生长指标的变化是作物光合作用所积累生物量的反映^[27]。本研究表明,玉米拔节期土壤水分保持在 50%~

80% FC 会抑制其生长发育,保持在 60%~90% FC 及以上有利于其生长,其原因可能是拔节期适当降低灌水下限有助于玉米根系向深处生长,从而促进玉米吸水,提高植株各生长指标,该生育期 60%~90% FC 处理的各生长指标均高于其他处理。从扬

花期直至完熟期玉米营养发育完全,保持土壤水分在 50% ~ 80% FC 会对玉米造成水分胁迫,其生殖生长会受到抑制,因此土壤水分保持为 70% ~ 100% FC 能给玉米提供正常的水分需求,有利于提高干物质积累量。有学者研究表明^[28-29],由于玉米干旱复水后的自发性补偿效应,玉米在拔节期轻度土壤水分亏缺有助于玉米根系向深层土壤生长,不会对植株生长造成较大影响;但玉米生长进入扬花-灌浆期以后必须保持土壤水分充足才有助于玉米高产,这与本试验结果类似。

大量研究发现,水分亏缺灌溉可通过调控土壤水分的方式给玉米提供一个适度的干旱条件来提高品质指标^[30],虽然该灌溉模式降低了玉米的产量,但是提高了其淀粉、粗蛋白、粗脂肪等品质营养指标。本研究表明灌浆-完熟期适度提高土壤水分下限并保持在 70% ~ 100% FC 有利于提高玉米的品质指标,而当根区土壤水分降至 50% ~ 80% FC 时,玉米品质指标会显著降低,该结果与吕剑等^[31]的研究结论一致。

本次试验结果表明,不同生育期灌水上、下限虽然对玉米穗部性状影响不大,但对玉米产量有影响,如 T_3 处理的产量要显著高于 T_1 处理,其原因可能是:在玉米拔节期降低土壤水分上、下限为 50% ~ 80% FC 虽然抑制了玉米的营养生长,但扬花-灌浆期及其以后生育期的根区土壤水分始终保持在 70% ~ 100% FC,水分供应充足,水分胁迫较小,受补偿效应的影响使玉米产量得到提高。有学者研究表明,不同时期的干旱缺水是影响作物产量的因素之一,在一定时期适度亏缺水分可能有助于增加产量和提高 WUE^[32],这与本试验结果类似。另有学者研究指出,灌水量越小则作物的 WUE 越高^[33-34],而本研究结果与其并不完全一致,例如 T_8 处理的耗水总量小于 T_3 处理,但是 T_3 处理的 WUE 要高于 T_8 处理,其原因可能是 T_8 处理在灌浆-完熟期的土壤水分保持在 50% ~ 80% FC,受水分胁迫的影响,玉米产量的降幅要比耗水总量减少的幅度更大,从而降低了 WUE。另外本研究发现,随着耗水总量的增大, WUE 先增大后减小,并且比产量先达到峰值,这一结果与王国栋等^[35]的结论类似。

本研究基于熵权法对各研究指标进行综合评价分析,有效避免了单一指标评优所产生的误差,评价结果与轩瑞瑞等^[36]的研究结论类似。此外,本次试验结果在不同玉米品种、试验环境和土壤质地等条件下的适用性还需要进一步研究和探讨。

5 结 论

(1) 在玉米拔节期适当降低土壤水分下限,将土壤水分上、下限保持在 60% ~ 90% FC 有利于玉米植株的生长发育;扬花-灌浆期及灌浆-完熟期保持土壤水分上、下限为 70% ~ 100% FC 可促进玉米的生殖生长,但土壤水分为 50% ~ 80% FC 会造成严重的水分胁迫,将抑制玉米的营养和生殖生长。

(2) 玉米产量最高的 T_3 处理 (17 114.51 kg/hm²) 较最低的 T_1 处理 (13 772.32 kg/hm²) 提高了 25.12%, WUE 最高的为 T_4 处理 (3.11 kg/hm³), 较最低的 T_9 处理 (2.45 kg/m³) 提高了 27.14%, 玉米的产量和 WUE 均随耗水量的增加先增大后降低。

(3) 玉米淀粉含量各处理之间差异不明显,含量最高的为 T_3 处理 (69.96 g/100g), 较最低的 T_1 处理 (65.58 g/100g) 提高了 6.7%; 粗蛋白和粗脂肪含量均为 T_3 处理最高 (11.02、4.11 g/100g), 相应较最低的 T_8 处理 (8.66 g/100g) 和 T_1 处理 (3.20 g/100g) 分别提高了 27.3%、28.4%, T_3 处理的营养综合品质最高。

(4) 基于熵权法的综合评价结果, T_3 处理最优, 建议新疆北疆地区春玉米不同生育期适宜的水分上、下限分别为: 拔节期 50% ~ 80% FC; 扬花-灌浆期 70% ~ 100% FC; 灌浆-完熟期 70% ~ 100% FC。

参考文献:

- [1] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959.
- [2] 许红根, 陈江鲁, 张镇涛, 等. 基于 APSIM 模型的新疆春播中晚熟玉米最适播期研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2018, 36(2): 153-158.
- [3] 新疆维吾尔自治区统计局, 国家统计局新疆调查总队. 2021 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [4] 王振华, 陈学庚, 郑旭荣, 等. 关于我国大田滴灌未来发展的思考[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 1-9+38.
- [5] 刘虎, 魏永富, 郭克贞, 等. 水分胁迫对北疆地区人工牧草产量的影响[J]. 中国水土保持, 2015(3): 54-57+69.
- [6] 文明, 李明华, 蒋家乐, 等. 氮磷钾运筹模式对北疆滴灌棉花生长发育和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(16): 3473-3487.
- [7] 刘慧, 陈龙. 物联网技术在智慧农业节水灌溉中的应用[J]. 中国科技信息, 2018(12): 61+63.
- [8] 吉宗仁. 浅析我国智慧农业的发展现状、路径与对策建议[J]. 新农业, 2022(18): 65-67.
- [9] 郑国玉, 朱新萍, 周建伟, 等. 滴灌土壤水分下限对春玉

- 米生长发育及水分利用效率的影响[J]. 河北农业科学, 2020, 24(4): 56–61.
- [10] 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.
- [11] SINCLAIR R T, BINGHAM G E, LEMON E R, et al. Water use efficiency of field-grown maize during moisture stress[J]. Plant Physiology, 1975, 56(2): 245–249.
- [12] AKINREMI O O. Simulation of soil moisture and other components of the hydrological cycle using a water budget approach [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1996, 76(2): 133–142.
- [13] SU Bingqian, SHANGGUAN Zhouping. Response of water use efficiency and plant – soil C: N: P stoichiometry to stand quality in *Robinia pseudoacacia* on the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2021, 206: 105571.
- [14] ZHANG Xin, SUI Shijiang, TAO yu, et al. Effects of different amounts of straw returning on corn yield and water use efficiency [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(19): 4581–4583.
- [15] KANG Shaozhong, ZHANG Lu, LIANG Yinli, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2002, 55(3): 202–216.
- [16] 董智强, 李曼华, 李楠, 等. 山东夏玉米土壤干旱阈值研究与影响评价[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4376–4387.
- [17] 马锦良, 胡笑涛, 王文娥. 苗期玉米对根区局部供水不同灌水下限的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 85–90.
- [18] 宋利兵, 姚宁, 冯浩, 等. 不同生育阶段受旱对旱区夏玉米生长发育和产量的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(1): 63–73.
- [19] 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.
- [20] 陈欣, 郭猛, 黄勇, 等. 长宽法测定地黄叶面积的校正系数研究[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(2): 293–295+298.
- [21] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定: GB 5009.9—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [22] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [24] 杜娅丹, 曹红霞, 柳美玉, 等. 基于层次分析法和熵权法的 TOPSIS 模型在番茄生长综合评价中的应用[J]. 西北农业学报, 2015, 24(6): 90–96.
- [25] 王兴亚, 张守梅, 郭玉秋, 等. 收获期对高水分玉米籽粒湿贮品质及真菌毒素的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(4): 146–150.
- [26] 王勇, 纪聪利, 黄健花, 等. 玉米胚芽水分含量对其油脂品质的影响[J]. 中国油脂, 2018, 43(5): 145–148.
- [27] 徐龙龙, 殷文, 胡发龙, 等. 水氮减量对地膜玉米免耕轮作小麦主要光合生理参数的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(2): 437–447.
- [28] 段伟娜, 徐家屯, 曹玉鑫, 等. 夏玉米不同生育期亏缺—复水对蒸发蒸腾和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 18–26.
- [29] KAZEMPOR M, ZAKERNEJAD S. Assess effect of deficit irrigation and super absorbent ploymer on crop production and growth indices of corn under dry and warm climate condition [J]. Journal of Crop Nutrition Science, 2019, 5(1): 1–17.
- [30] 陆大雷, 孙旭利, 王鑫, 等. 灌浆结实期水分胁迫对糯玉米粉理化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(1): 30–36.
- [31] 吕剑, 金宁, 郁继华, 等. 基质栽培黄瓜生长、产量及品质对不同灌水下限的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 107–115.
- [32] 何平如, 张富仓, 范军亮, 等. 土壤水分调控对南疆滴灌棉花生长、品质及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 39–46.
- [33] 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.
- [34] FARRE I, FACI J M. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment [J]. Agricultural Water Management, 2008, 96(3): 383–394.
- [35] 王国栋, 胜和, 陈云, 等. 控墒补灌下春玉米光合特性、叶片衰老研究及最适灌溉量估算[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 19–26.
- [36] 轩瑞瑞, 陈艳萍, 刘春菊, 等. 基于熵权法和灰色关联度法的鲜食糯玉米品质评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 241–248.