

土壤水分阈值对北疆膜下滴灌棉花生长、 耗水规律及产量的影响

高 瑞^{1,2}, 陈志卿³, 洪 明^{1,2}, 景彦强^{1,2}, 陈杏子^{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: 为探明北疆地区膜下滴灌棉花主要生育期适宜的土壤水分阈值, 在蕾期、花铃期、吐絮期设置了3个土壤水分阈值区间包括(50%~80%)FC(FC为田间持水量)、(60%~90%)FC和(70%~100%)FC组成正交试验, 并以当地农户灌溉为对照组(CK), 定量分析了各生育期土壤水分阈值对棉花生长指标、耗水规律和产量的影响。结果表明: 各生育期土壤水分阈值为(50%~80%)FC时, W1处理棉花株高、茎粗、叶面积指数(LAI)、地表干物质积累量均较CK处理显著降低了26.8%、22.0%、37.1%、14.3% ($p < 0.05$), 全生育期耗水量较CK处理减少了37.2%。W6处理的单株铃数和籽棉产量均最高(6.41个、5 848.99 kg/hm²), W4处理的水分利用效率(WUE)最高(1.28 kg/m³), W9处理的单铃重最高(5.41 g), W5处理衣分最高(42.51%), 分别较CK处理增加了10.9%、10.1%、21.9%、1.5%、3.1%。基于熵权-TOPSIS的综合评价结果表明W6处理最优, 建议北疆地区膜下滴灌棉花蕾期、花铃期和吐絮期土壤水分阈值分别设为(60%~90%)FC、(70%~100%)FC和(50%~80%)FC。

关键词: 棉花; 土壤水分阈值; 生长; 耗水; 产量; 熵权-TOPSIS; 北疆地区

中图分类号: S157; S562

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)06-0200-10

Effects of soil moisture threshold on growth, water consumption and yield of cotton under mulched drip irrigation in northern Xinjiang

GAO Rui^{1,2}, CHEN Zhiqing³, HONG Ming^{1,2}, JING Yanqiang^{1,2}, CHEN Xingzi^{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: In order to determine the suitable soil moisture threshold for the main growth stages of cotton under mulched drip irrigation in northern Xinjiang, three soil moisture threshold intervals ((50% - 80%)FC (FC is the field water capacity), (60% - 90%)FC and (70% - 100%)FC) were set up during the bud stage, flowering and boll stage, and boll blowing stage. An orthogonal experiment was conducted, and local farmers' irrigation scheme was used as a control (CK) to quantitatively analyze the effect of soil moisture threshold on cotton growth indicators, water consumption and yield during each growth stage. The results showed that at (50%~80%)FC, cotton plant height, stem thickness, leaf area index (LAI) and above-ground dry matter accumulation of treatment W1 were significantly reduced by 26.8%, 22.0%, 37.1%, and 14.3% ($p < 0.05$), respectively, and water consumption in the whole growth period was reduced by 37.2% compared with the treatment CK. The treatment W6 produced the highest number of bolls and seed cotton yield (6.41, 5 848.99 kg/hm²); W4 had the highest water use efficiency (1.28 kg/m³); W9 scored the highest weight of single bolls (5.41 g); W5 presented the

收稿日期:2023-05-18; 修回日期:2023-09-07

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:高 瑞(1998—),男,陕西武功人,硕士研究生,研究方向为农业水资源高效利用。

通讯作者:陈志卿(1974—),男,新疆乌鲁木齐人,高级工程师,硕士生导师,主要从事节水灌溉技术应用推广与节水灌溉产品研发。

highest cotton lint percentage (42.51%). The above indicators of individual treatments were increased by 10.9%, 10.1%, 21.9%, 1.5% and 3.1%, respectively, compared with CK treatment. The comprehensive evaluation results of entropy weight - TOPSIS indicates that W6 is the optimal treatment. It is suggested that the suitable soil moisture thresholds for the bud stage, boll stage and boll blowing stage of cotton under mulched drip irrigation in northern Xinjiang are (60% - 90%) FC, (70% - 100%) FC and (50% - 80%) FC, respectively.

Key words: cotton; soil moisture threshold; growth; water consumption; yield; entropy weight - TOPSIS; northern Xinjiang

1 研究背景

新疆维吾尔自治区(下称新疆)位于我国西北内陆干旱区,降水稀少,蒸发强烈,是典型的荒漠绿洲灌溉农业区^[1]。2019年新疆水资源总量为 $870.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,全疆总用水量为 $554.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中灌溉用水为 $506.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,占用水总量的91.4%^[2],农业用水量,农业生产高度依赖灌溉^[3]。但目前新疆农业用水效率不高,农业灌溉水利用系数仅为0.54,远低于发达国家0.70以上的水平^[4-5]。20世纪90年代,新疆将滴灌和覆膜栽培相结合,发明了膜下滴灌技术,并在新疆主要农作物中进行了大面积的推广应用^[6-7],为推动新疆乃至全国的农业高效用水做出了巨大贡献。然而当前滴灌技术模式下的灌溉管理仍然多依靠农户的经验,灌溉水利用系数难以进一步提升^[8]。近年来,随着物联网技术在农业领域中的广泛应用,传统灌溉向智慧灌溉的转型成为可能^[9-10]。为进一步提高水资源利用效率,确保新疆绿洲农业的可持续发展,推广适时适量的精准化灌溉技术势在必行^[11]。因此,基于智能化土壤水分传感器,提出高产优质的灌溉决策指标就成为不同作物灌溉管理从传统灌溉向智能化灌溉升级中亟待解决的关键问题之一。

棉花作为新疆地区主要的经济作物之一,其种植面积和产量多年位居全国首位^[12-13]。2022年新疆棉花种植面积为 $249.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占全国棉花总种植面积的83.2%;棉花产量为 $539.1 \times 10^4 \text{ t}$,占全国棉花总产量的90.2%^[14]。较大的种植面积导致新疆地区农业灌溉水需求量不断增加,区域水资源供需矛盾日益突出^[15]。为进一步探究棉花种植的节水潜力,近年来国内外学者做了大量研究。研究表明,相较于充分灌溉的棉花,在不显著降低产量的情况下,非充分灌溉的棉花水分生产率更高^[16]。在对不同土壤基质势水平进行调控时,随着土壤基质势下限的提高,棉花株高、叶面积指数(leaf area index, LAI)和地表干物质积累量也随之增加^[17]。另外,有学者通过控制土壤水分下限得出,整个生育期土壤水分下限均宜控制在

75%FC(田间持水量,FC为田间持水量)^[18],蕾期和花铃期灌水下限分别为65%FC和75%FC时棉花产量相对较高^[19]。李彦等^[20]研究表明,棉花苗期、蕾期、花铃期、吐絮期土壤水分下限分别为(60%~65%)FC、(65%~70%)FC、(80%~85%)FC、(55%~60%)FC时棉花的水分利用效率最高。王凤姣等^[21]将土壤水分传感器埋设在滴头正下方40cm处时,得出棉花苗期、蕾期、花铃期、吐絮期灌水阈值分别为(60%~65%)FC、(65%~70%)FC、(75%~80%)FC、(65%~70%)FC时较为适宜。

受研究手段的限制,已有研究结果多是通过控制土壤水分下限条件得到。兼顾实时测定并能实现数据远程传输的土壤水分传感器的不断涌现,使控制土壤水分上限成为可能。但目前基于土壤水分传感器同时开展棉花适宜土壤水分上、下限的研究鲜有报道,且土壤水分传感器埋设数量和位置的不同对灌溉决策指标仍存在一定影响。因此,本文通过固定埋设土壤水分传感器的位置,开展同时改变土壤水分上、下限的田间灌溉试验,研究土壤水分阈值对棉花生长指标、耗水规律和产量的影响,进而确定棉花不同生育期适宜的土壤水分阈值,以期为北疆地区棉花灌溉管理升级提供理论依据。

2 材料和方法

2.1 试验地概况

试验于2021年4—10月在新疆克拉玛依市农业综合开发区(地理位置84°55' E,45°27' N,海拔213m)进行,试验区地处准噶尔盆地西北部,属于典型的内陆干旱性气候,多年平均降水量为109.4mm,多年平均蒸发量达3345.2mm,平均无霜期为190d。试验区年温差与月温差大,大风天气多,多年平均气温为8.5℃,最高气温可达44.1℃,最低气温为-35.9℃,历年平均风速为3.3m/s,瞬时最大风速达42.2m/s以上。试验地以砂壤土为主,0~60cm土壤的理化性质见表1。灌溉用水来自克拉玛依市西郊水库,通过灌溉管网输送至田间,灌溉水矿化度为1.0~2.5g/L。

表1 试验地土壤理化性质

土壤深度/ cm	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (g · kg ⁻¹)	速效磷/ (g · kg ⁻¹)	速效钾/ (g · kg ⁻¹)	pH	容重/ (g · cm ⁻³)	田间持 水量/%
0~20	11.85	0.41	0.88	21.16	29.18	11.85	103.87	7.13	1.46	31.41
20~40	10.91	0.53	0.83	16.94	30.11	10.61	106.52	7.11	1.53	24.60
40~60	8.08	0.47	0.79	16.73	25.49	8.03	80.11	7.17	1.51	25.71

2.2 试验材料

供试棉花品种为“新陆早73”，于2021年4月21日播种，采用“干播湿出”的栽培技术，当年10月15日收获，生育期共计177 d。供试棉花采用1膜3管6行的种植模式，株距为10 cm、行距为10 cm + 66 cm，滴头流量为2.4 L/h，滴头间距为0.3 m，试验棉花种植模式及土壤水分测位点如图1所示。根据当地施肥经验，试验区棉花全生育期追施尿素542.86 kg/hm²、磷酸一铵168.06 kg/hm²、硫酸钾155.62 kg/hm²，苗期、蕾期、花铃期分别追施肥料比例为10%、20%、70%。各处理施肥水平一致，所有肥料均采用压差式施肥罐随水滴施。试验期间田间

管理措施均与当地农户保持一致。

2.3 试验设计

供试棉花分为4个生育期：苗期、蕾期、花铃期和吐絮期，由于苗期棉花通常要“蹲苗”，因此苗期不做水分处理。本试验将棉花蕾期、花铃期和吐絮期分别设为3个因素，各因素下设置3种不同的灌溉水平，即(50%~80%)FC、(60%~90%)FC和(70%~100%)FC，组成3因素3水平正交试验，共9个处理，以当地农户的灌溉为对照试验(CK)，试验设计方案见表2。为减小试验误差，每个处理设3个重复，试验采用完全随机布置，并在各小区间设置保护行。

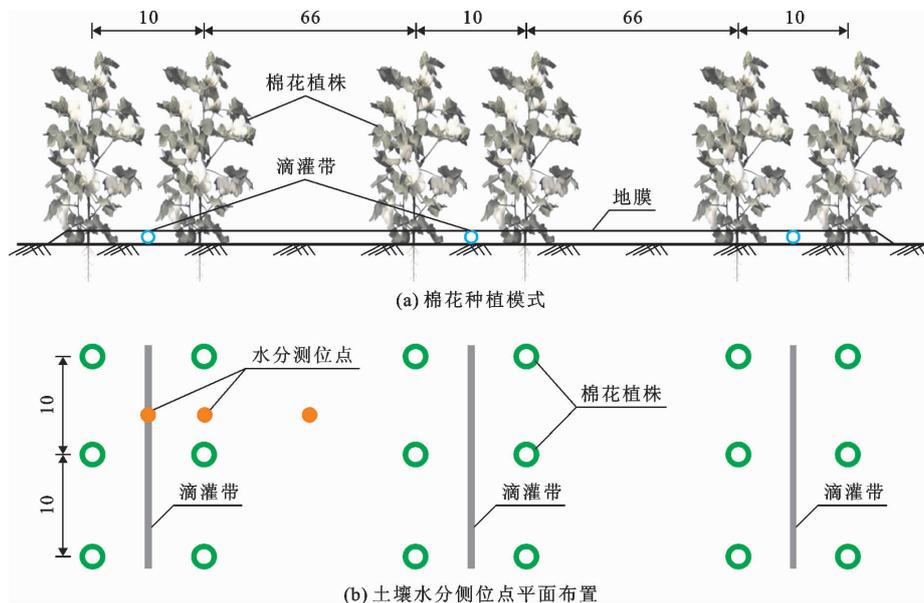


图1 棉花种植模式及土壤水分测位点示意图(单位:cm)

2.4 各指标的测定及计算方法

(1) 土壤水分:本试验在棉花植株的正下方30 cm处埋设大仁科TDR-200土壤水分传感器用于控制土壤水分阈值^[21-22],该传感器可实时监测土壤水分,并实现数据传输。同时在窄行行间(滴灌带正下方)、株间及宽行行间埋设土壤水分探管,采用Diviner 2000便携式土壤水分廓线仪在灌水前后按10 cm的间隔测定0~100 cm深度内的土壤含水率,

用于计算棉花的实际耗水量。试验前分别用烘干法对两种设备进行校订。

(2) 棉花生长指标测定:①用卷尺测定棉花子叶节到顶部第1片展开叶片高度的距离作为株高。②以子叶节至第1片真子叶之间最细的茎作为茎粗^[23],用游标卡尺测量。③将样品放在105℃烘箱中杀青30 min,再将温度降至75℃烘至恒重作为地表干物质积累量。④通过长宽系数法计算棉花叶面

积指数^[24]。

(3)产量:在各试验小区内随机选取 3 个 1 m × 1 m 的样方,测定其中棉花的单株铃数、烘干后单铃重和籽棉产量,取其均值并换算为每公顷产量。

(4)耗水量:棉花耗水量的计算采用水量平衡法,计算方法如公式(1)。

$$ET_t = \Delta W_t + P_0 + K + I \quad (1)$$

式中: ET_t 为时段 t 内棉花的耗水量,mm; ΔW_t 为初始时段和时段末土壤 0 ~ 100 cm 处的含水量差值,mm; P_0 为 t 时段内有效降水量,mm; K 为时段 t 内地地下水补给量,mm; I 为 t 时段内灌水量,mm。

(5)水分利用效率(water use efficiency, WUE)的计算方法如下:

$$WUE = \frac{Y}{b \cdot ET} \quad (2)$$

式中: WUE 为棉花水分利用效率,kg/m³; Y 为籽棉产量,kg/hm²; ET 为棉花全生育期耗水量,mm; b 为单位换算系数,取 $b = 10$ 。

(6)熵权法作为一种客观评价方法避免了层次分析法和模糊分析法等方法的主观随意性^[25],具体计算步骤如下:

①根据评价指标数 n 和处理方案数 m ,构建评价矩阵 $X_{ij} = [x_{ij}]_{n \times m}$,并进行数据标准化处理,得到标准化矩阵 $X'_{ij} = [x'_{ij}]_{n \times m}$ 。本研究耗水量为负向指标,其余指标均为正向指标,数据标准化计算方法如公式(3)、(4)所示。

$$\text{负向指标: } x'_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (3)$$

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (4)$$

式中: x'_{ij} 为各评价指标经标准化处理之后得到的

值; $i = 1, 2, \dots, n$ (n 为评价指标数), $j = 1, 2, \dots, m$ (m 为处理数)。

②指标归一化处理,计算标准化矩阵的第 i 项指标占第 j 个处理的特征比重 P_{ij} 。

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{j=1}^m x'_{ij}} \quad (5)$$

③计算第 i 个评价指标的信息熵 e_i 。

$$e_i = \frac{-\sum_{j=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}}{\ln n} \quad (6)$$

④计算各指标权重 W_i 。

$$W_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^n (1 - e_i)} \quad (7)$$

(7)TOPSIS 评价方法:通过各指标权重 W_i 和标准矩阵 X'_{ij} 的乘积得到加权后标准化矩阵,对加权后标准化矩阵计算求得各指标的正理想解 Z^+ 和负理想解 Z^- ,并得出各处理到正、负理想解的距离 d_j^+ 、 d_j^- ,最终得出各处理的相对贴近度 C_j , C_j 值越大表明整体水平越优^[26]。计算过程如公式(8) ~ (10) 所示。

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i^+ - z_{ij})^2} \quad (8)$$

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i^- - z_{ij})^2} \quad (9)$$

$$C_j = \frac{d_j^-}{d_j^- + d_j^+} \quad (10)$$

2.5 数据处理与统计分析

利用 SPSS 22.0 对试验数据进行显著性分析和方差分析,采用 Origin 9.0 绘图,并使用熵权-TOPSIS 综合评价方法决策最优处理。

表 2 正交试验设计方案

处理	蕾期	花铃期	吐絮期
W1	(50%~80%) FC	(50%~80%) FC	(50%~80%) FC
W2	(50%~80%) FC	(60%~90%) FC	(60%~90%) FC
W3	(50%~80%) FC	(70%~100%) FC	(70%~100%) FC
W4	(60%~90%) FC	(50%~80%) FC	(60%~90%) FC
W5	(60%~90%) FC	(60%~90%) FC	(70%~100%) FC
W6	(60%~90%) FC	(70%~100%) FC	(50%~80%) FC
W7	(70%~100%) FC	(50%~80%) FC	(70%~100%) FC
W8	(70%~100%) FC	(60%~90%) FC	(50%~80%) FC
W9	(70%~100%) FC	(70%~100%) FC	(60%~90%) FC

3 结果与分析

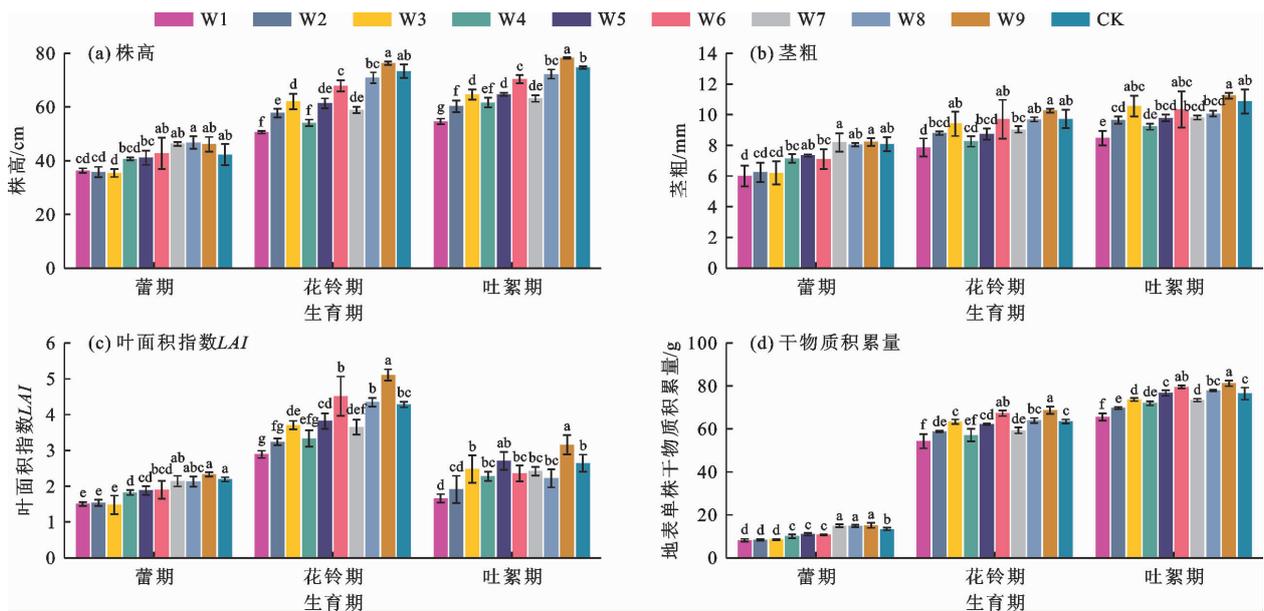
3.1 土壤水分阈值对棉花生长指标的影响

不同处理方式下,各生育期棉花的株高、茎粗、*LAI*及地表干物质积累量变化如图2所示。

将图2中不同生育期各水分阈值下的株高、茎粗、*LAI*、地表干物质积累量进行比较分析如下:

蕾期当土壤水分阈值为(50%~80%)*FC*时,W1~W3处理株高、茎粗和*LAI*分别较CK处理显著减少了14.2%~16.3%、22.8%~25.6%、29.7%~32.4% ($p < 0.05$)。各处理间,(60%~90%)*FC*(W4~W6)和(70%~100%)*FC*(W7~W9)相较于

(50%~80%)*FC*(W1~W3)株高分别增加了12.1%~20.9%、27.0%~32.2%,茎粗分别增加了13.8%~22.1%、29.0%~36.8%,*LAI*分别增加了18.2%~28.4%、37.7%~57.4%。土壤水分阈值为(70%~100%)*FC*(W7~W9)处理的地表干物质积累量最大,较CK处理显著增加了10.6%~12.9% ($p < 0.05$)。各处理间地表干物质积累量随土壤水分阈值的升高呈现出W7~W9 > W4~W6 > W1~W3。综上,蕾期不同水分阈值下的棉花各生长指标均呈现为(50%~80%)*FC* < (60%~90%)*FC* < (70%~100%)*FC*,且同一水分阈值条件下,不同处理间棉花各生长指标无显著性差异。



注:小写字母不同表示各处理间差异性显著($p < 0.05$),下同。

图2 各处理不同生育期棉花的株高、茎粗、*LAI*及地表干物质积累量

花铃期土壤水分阈值为(50%~80%)*FC*(W1、W4、W7)处理的株高、茎粗、*LAI*和地表干物质积累量分别较CK处理减小了19.8%~31.1%、7.0%~19.1%、14.7%~32.5%、6.6%~14.5%。当土壤水分阈值为(70%~100%)*FC*时,W3处理的株高、茎粗、*LAI*和地表干物质积累量分别较CK处理减少了15.4%、3.2%、13.3%、0.25%,而W9处理各指标分别较CK处理增加了4.0%、5.7%、19.4%、8.2%,W6处理株高和茎粗较CK处理分别减小了7.5%、0.1%,但*LAI*和地表干物质积累量较CK增加了5.6%、5.9%。当花铃期土壤水分阈值相同时,花铃期各生长指标随着蕾期土壤水分阈值的升高呈现出W1 < W4 < W7、W2 < W5 < W8、W3 < W6 < W9;蕾期土壤水分阈值相同时,花铃期的各生长指标随着土壤

水分阈值的升高呈现出W1 < W2 < W3、W4 < W5 < W6、W7 < W8 < W9。综上,花铃期各生长指标随土壤水分阈值的升高呈现出(70%~100%)*FC* > (60%~90%)*FC* > (50%~80%)*FC*,且相同水分阈值条件下,花铃期各生长指标与蕾期土壤水分阈值呈正比例关系。

吐絮期株高和茎粗生长趋于稳定。各处理*LAI*整体呈下降趋势,当土壤水分阈值为(70%~100%)*FC*时,(W3、W5、W7)各处理*LAI*分别较花铃期减少了33.1%、29.1%、33.7%,而土壤水分阈值为(50%~80%)*FC*(W1、W6、W8)各处理*LAI*分别较花铃期减少了42.6%、47.8%、48.8%。W9处理地表干物质积累量最大,较CK处理显著增加了6.2% ($p < 0.05$)。W1处理地表干物质积累量最

小,较CK处理显著减少了14.3% ($p < 0.05$),各处理地表干物质积累量由大到小排序为W9 > W6 > W8 > W5 > CK > W3 > W7 > W4 > W2 > W1。综上,吐絮期各处理的地表干物质积累量整体呈现增加的趋势;随土壤水分阈值的降低,棉花吐絮期各处理

LAI较花铃期减小量呈现(50%~80%) $FC > (70\% \sim 100\%) FC$ 。

3.2 土壤水分阈值对各处理棉花耗水指标的影响

各处理棉花在不同生育期的耗水量及耗水强度如表3所示。

表3 各处理棉花不同生育期的耗水量及耗水强度

生育期	起止日期	W1		W2		W3		W4		W5	
		耗水量/耗水强度/ mm (mm · d ⁻¹)									
苗期	04-21—06-24	75.45	1.18	71.85	1.12	71.25	1.11	73.55	1.15	78.35	1.22
蕾期	06-25—07-20	76.98	2.96	69.18	2.66	73.58	2.83	87.12	3.35	88.32	3.40
花铃期	07-21—09-07	123.17	2.51	190.05	3.88	255.23	5.21	120.67	2.46	188.55	3.85
吐絮期	09-08—10-15	40.83	1.07	42.73	1.12	59.77	1.57	47.23	1.24	69.67	1.83
全生育期	04-21—10-15	316.43		373.81		459.83		328.57		424.89	
生育期	起至日期	W6		W7		W8		W9		CK	
		耗水量/耗水强度/ mm (mm · d ⁻¹)									
苗期	04-21—06-24	80.85	1.26	72.85	1.14	79.35	1.24	79.45	1.24	66.65	1.04
蕾期	06-25—07-20	84.82	3.26	101.56	3.91	101.16	3.89	97.66	3.76	108.75	4.18
花铃期	07-21—09-07	254.83	5.20	138.07	2.82	199.25	4.07	268.43	5.48	275.95	5.63
吐絮期	09-08—10-15	41.53	1.09	68.57	1.80	49.23	1.30	51.23	1.35	52.63	1.39
全生育期	04-21—10-15	462.03		381.05		428.99		496.77		503.98	

由表3可知,苗期各处理的棉花灌溉水平一致,因此各处理耗水量和耗水强度基本一致。蕾期W1~W9处理的耗水量和耗水强度分别为69.18~101.56 mm、2.66~3.91 mm/d。土壤水分阈值为(50%~80%) FC (W1~W3)处理的耗水量和耗水强度分别较CK处理减少了31.77~39.57 mm、1.22~1.52 mm/d。土壤水分阈值为(70%~100%) FC (W7~W9)处理的耗水量和耗水强度分别较CK处理减少了7.19~11.09 mm、0.27~0.42 mm/d。各处理间,棉花耗水量和耗水强度随土壤水分阈值的升高呈现出W1~W3 < W4~W6 < W7~W9。花铃期W1~W9处理的耗水量和耗水强度分别为120.67~268.43 mm、2.46~5.48 mm/d。土壤水分阈值为(50%~80%) FC (W1、W4、W7)处理的耗水量和耗水强度较CK处理分别减少了137.88~155.28 mm、2.81~3.17 mm/d。土壤水分阈值为(70%~100%) FC (W3、W6、W9)处理的耗水量和耗水强度较CK处理分别减少7.52~21.12 mm、0.15~0.43 mm/d。各处理间棉花耗水量和耗水强

度均呈现出(W1、W4、W7) < (W2、W5、W8) < (W3、W6、W9)。吐絮期W1~W9处理的耗水量和耗水强度分别为40.83~69.67 mm、1.07~1.83 mm/d。土壤水分阈值为(50%~80%) FC (W1、W6、W8)处理的耗水量和耗水强度较CK处理分别减少了3.40~11.80 mm、0.09~0.32 mm/d。土壤水分阈值为(70%~100%) FC (W3、W5、W7)处理的耗水量和耗水强度较CK处理分别增加了7.14~17.04 mm、0.18~0.44 mm/d。各处理间,棉花耗水量和耗水强度均呈现出(W1、W6、W8) < (W3、W5、W7)。不同处理全生育期棉花总耗水量由大到小排序为CK > W9 > W6 > W3 > W8 > W5 > W7 > W2 > W4 > W1, W1~W9处理与CK处理相比总耗水量分别减少了37.2%、25.8%、8.8%、34.8%、15.7%、8.3%、24.4%、14.9%、1.4%。

综上,棉花各生育期耗水量和耗水强度基本呈现(50%~80%) FC < (60%~90%) FC < (70%~100%) FC ,蕾期、花铃期和吐絮期的耗水量大小顺序为花铃期 > 蕾期 > 吐絮期。

3.3 土壤水分阈值对棉花产量和水分利用效率的影响

W1~W9及CK各处理棉花的单株铃数、单铃

重、衣分和籽棉产量指标与水分利用效率(WUE)如表4所示。

表4 各处理棉花产量指标和水分利用效率

处理	单株铃数	单铃重/g	衣分/%	籽棉产量/(kg·hm ⁻²)	WUE/(kg·m ⁻³)
W1	4.41±0.14e	4.63±0.50b	41.07±0.66ab	3978.75±107.34h	1.26±0.03ab
W2	5.32±0.35bcd	5.11±0.06a	41.59±0.82ab	4516.26±80.08f	1.21±0.02b
W3	4.94±0.60de	5.27±0.08a	42.29±1.12a	4841.18±72.61de	1.05±0.02e
W4	5.12±0.41cde	5.05±0.28ab	40.89±1.26ab	4214.42±68.35g	1.28±0.02a
W5	5.48±0.43bcd	5.19±0.03a	42.51±0.46a	4720.77±113.62e	1.11±0.03cd
W6	6.41±0.40a	5.31±0.13a	41.25±0.69ab	5848.99±119.26a	1.27±0.03a
W7	4.85±0.46de	5.04±0.32ab	41.53±0.41ab	4139.26±95.71gh	1.09±0.03de
W8	5.88±0.11ab	5.09±0.05a	41.69±0.41ab	4927.79±162.15d	1.15±0.04c
W9	6.04±0.19ab	5.41±0.07a	40.13±0.82b	5564.92±49.47b	1.12±0.01cd
CK	5.78±0.39abc	5.33±0.12a	41.22±0.99ab	5311.98±72.64c	1.05±0.01e

对表4中各处理棉花产量和水分利用效率比较分析如下:

单株铃数由大到小排序为W6>W9>W8>CK>W5>W2>W4>W3>W7>W1,其中W1、W3、W7处理的单株铃数较CK显著降低了23.7%、14.5%、16.1%($p<0.05$)。各处理间W6处理单株铃数与W1、W2、W3、W4、W5、W7处理相比分别显著增加了45.4%、20.5%、29.8%、25.2%、17.0%、32.2%($p<0.05$)。由W6和W9处理的单株铃数较多而W1和W7处理较少可知,花铃期土壤水分为(70%~100%)FC时有利于提高棉花单株铃数,而土壤水分为(50%~80%)FC时会减少单株铃数。各处理单铃重由大到小排序为W9>CK>W6>W3>W5>W2>W8>W4>W7>W1,其中W1处理单铃重较CK处理显著降低了13.1%($p<0.05$)。除W1处理外,其他各处理间无显著性差异。各处理衣分由大到小排序为W5>W3>W8>W2>W7>W6>CK>W1>W4>W9,试验各处理与CK无显著性差异。综上,单株铃数与花铃期土壤水分阈值成正比,但各生育期土壤水分阈值对棉花单铃重和衣分影响较小。

比较各处理籽棉产量,除W6、W9处理较CK显著增加10.1%和4.8%($p<0.05$)外,其余各处理均较CK显著减少了7.2%~25.1%($p<0.05$)。各处理间W6处理籽棉产量分别比W1、W2、W3、W4、W5、W7、W8、W9处理显著增加了47.0%、29.5%、20.8%、38.8%、23.9%、41.3%、18.7%、5.1%($p<0.05$),表明花铃期较高的土壤水分阈

值有利于籽棉产量的形成。花铃期土壤水分阈值为(70%~100%)FC(W3、W6、W9)处理的籽棉产量均高于土壤水分阈值为(50%~80%)FC(W1、W4、W7)处理,分析认为,花铃期较低的土壤水分阈值使棉花受到一定程度的水分胁迫,导致棉花光合速率减弱,影响了籽棉产量。各处理中W4处理的WUE最高,比CK处理显著增加了21.9%($p<0.05$),分别比W2、W3、W5、W7、W8、W9处理显著增加了5.8%、21.9%、15.3%、17.4%、11.3%、14.3%($p<0.05$),与W1、W6处理无显著性差异。由W1、W4处理的WUE偏高可知,各生育期适当降低土壤水分阈值有利于提高棉花的WUE;W6处理的WUE偏高表明,在非需水关键期(蕾期、吐絮期)适当降低土壤水分阈值,可减少灌水量且对籽棉产量影响较小,最终使棉花的WUE增加。

综上,花铃期土壤水分阈值为(70%~100%)FC时有利于提高棉花籽棉产量,而土壤水分阈值为(50%~80%)FC时会显著降低籽棉产量,因此花铃期土壤水分阈值会显著影响籽棉产量。各生育期WUE随着土壤水分阈值的降低而增加,但在棉花需水关键生育期(花铃期)提高土壤水分阈值同样有利于提高WUE。

3.4 熵权-TOPSIS综合评价

通过对棉花产量和水分利用效率等主要指标试验结果的分析可知,各指标的最优值并未指向同一个处理,且在进行灌溉决策时,单一指标并不能全面反映棉花的产量及效益情况。

熵权-TOPSIS作为一种多指标综合评价方法,

被广泛应用于作物的评价方案选优中^[3]。本试验将棉花单株铃数、单铃重、衣分、耗水量、籽棉产量和WUE分别用A1~A6表示,通过熵权法对W1~W9

处理中的不同指标进行标准化处理后可得到各指标的权重,最终通过TOPSIS分析方法进行评价选优,具体计算结果如表5所示。

表5 各处理方案评价指标标准化值、权重和相对贴近度

处理	A1	A2	A3	A4	A5	A6	相对贴近度 C_i	各处理 C_i 排序
W1	0.0000	0.0000	0.3950	1.0000	0.0000	0.9130	0.1992	9
W2	0.4550	0.6154	0.6134	0.6818	0.2874	0.6957	0.3673	6
W3	0.2650	0.8205	0.9076	0.2048	0.4611	0.0000	0.5045	4
W4	0.3550	0.5385	0.3193	0.9327	0.1260	1.0000	0.2807	7
W5	0.5350	0.7179	1.0000	0.3986	0.3968	0.2609	0.4831	5
W6	1.0000	0.8718	0.4706	0.1926	1.0000	0.9565	0.8923	1
W7	0.2200	0.5256	0.5882	0.6417	0.0858	0.1739	0.2321	8
W8	0.7350	0.5897	0.6555	0.3758	0.5074	0.4348	0.5787	3
W9	0.8150	1.0000	0.0000	0.0000	0.8481	0.3043	0.7928	2
权重	0.1629	0.1006	0.1272	0.1829	0.2364	0.1901		

由表5可知,通过熵权法得出各指标所占权重由大到小排序为A5>A6>A4>A1>A3>A2,其中棉花籽棉产量的权重最大,为0.2364(A5),WUE的权重次之,为0.1901(A6),单铃重(A2)的权重最小,为0.1006(A2)。由此可见籽棉产量(A5)和WUE(A6)对综合评价结果的影响程度较大,而单铃重(A2)对综合评价结果的影响程度最小。最终将A1~A6各指标的权重通过TOPSIS分析方法进行计算,得出各处理相对贴近度 C_i 由大到小排序为W6>W9>W8>W3>W5>W2>W4>W7>W1,其中W6处理相对贴近度为0.8923,W1处理相对贴近度为0.1992。因此W6处理整体水平最优。

4 讨论

随着土壤水分下限的降低,棉花株高、叶面积指数和地表干物质积累量显著减小^[27]。姬清元等^[28]研究发现,不同生育期土壤基质势调控对棉花生长影响显著,且较高的基质势有利于棉花生长发育。本研究表明,蕾期棉花各生长指标随土壤水分阈值的降低而减小,土壤水分阈值为(70%~100%)FC(W7~W9)处理的棉花各生长指标均显著高于(50%~80%)FC(W1~W3)处理,但过高或过低的土壤水分阈值均不利于对棉花株型的控制,容易造成营养生长过剩或不足,导致棉花减产^[29]。当土壤水分阈值为(60%~90%)FC时,棉花整体株型紧凑,叶片大小适中,蕾多且大,这与忠智博等^[30]的研究结果相似。花铃期棉花处于营养生长和生殖生长

并进的阶段,各生长指标均随着土壤水分阈值的升高而增大。当蕾期土壤水分阈值为(50%~80%)FC(W1~W3)处理时,花铃期各处理生长指标随着土壤水分阈值的升高呈现W1<W2<W3。这是由于蕾期土壤水分阈值过低,花铃期棉花产生补偿效应之后,光合产物在侧重生殖器官的养分供给前提下,对营养器官的养分供给随着花铃期土壤水分阈值的升高而增大所导致^[31]。吐絮期棉花株高和茎粗生长趋于稳定,而土壤水分阈值为(70%~100%)FC(W3、W5、W7)处理时,LAI减小速率较土壤水分阈值为(50%~80%)FC(W1、W6、W8)处理时明显降低,这是由于吐絮期较高的土壤水分阈值使棉花贪青,从而导致落叶难度增加^[32]。

前人研究表明,棉花最大耗水时段为现蕾—吐絮期,日均耗水量为3.06~4.15mm,花铃期耗水量为240.96mm,超过全生育期耗水总量的50%,一膜三管配置方式下全生育期需水总量为448~497mm^[8,33-34],与本试验研究结果基本一致。本研究发现,随各生育期土壤水分阈值的增大,棉花耗水量和耗水强度亦整体增大。以花铃期为例,棉花耗水量和耗水强度均呈现(50%~80%)FC(W1、W4、W7)<(60%~90%)FC(W2、W5、W8)<(70%~100%)FC(W3、W6、W9),这是由于土壤水分阈值越低,土壤表层含水率长期相对越低,减少了地表蒸发损失^[35],从而减缓了棉花灌水频次。

相关研究表明各生育期土壤水分阈值对棉花单铃重和衣分影响较小,但对棉花单株铃数、产量和

WUE 影响较大^[27,36]。本研究表明,当蕾期土壤水分阈值为(70%~100%) FC 时,W7~W9 处理单株铃数和籽棉产量均小于蕾期土壤水分阈值为(60%~90%) FC 的 W6 处理,分析认为,蕾期较高的土壤水分阈值容易导致棉花封行过早,通风透光性变差,使棉花的群体光合效率下降,影响了棉花单株铃数和籽棉产量的形成,并最终导致棉花减产。花铃期土壤水分阈值为(50%~80%) FC 时,W1、W4、W7 处理棉花单株铃数和籽棉产量均小于(70%~100%) FC 的 W3、W6、W9 处理,这是因为在花铃期随着土壤水分阈值的升高,光合产物输送到生殖器官的有机质总量增多^[37],棉花顶部和外部果枝上落铃率减少,从而增加了籽棉产量。 WUE 不仅与棉花整个生育期的总耗水量有关,而且与棉花的灌水时机有关,这与张迎春等^[38]的研究结果基本一致。降低土壤水分阈值有利于增加棉花的 WUE ,各生育期土壤含水率均为(50%~80%) FC 时,W1 处理的 WUE 相对较高。吐絮期较高的土壤水分阈值((70%~100%) FC)使棉花耗水量增加,但不利于 W3、W5、W7 处理籽棉产量的增加。因此合适的灌水时机也是影响 WUE 的重要因素,当灌溉量超过棉花蒸散量时,不仅会降低 WUE ,还有可能降低棉花产量^[39]。本试验通过熵权-TOPSIS 综合评价方法,得出的棉花蕾期和花铃期土壤水分阈值与前人结果类似^[19-21],但吐絮期土壤水分阈值结果偏低,导致这种情况的原因可能是试验地所在的新疆克拉玛依地区 2021 年秋季降温过早,影响了相对偏高土壤水分阈值处理的棉花吐絮率,降低了籽棉产量。

5 结 论

(1)不同生育期土壤水分阈值对棉花的生长指标有显著影响,较高的土壤水分阈值有利于棉花的生长发育。蕾期、花铃期土壤水分阈值为(70%~100%) FC 处理的各生长指标均高于(50%~80%) FC 处理;蕾期和吐絮期适当降低土壤水分阈值,有利于抑制棉花营养生长发育,达到节水、增产的目的。

(2)棉花各生育期耗水量和耗水强度与土壤水分阈值基本呈正比例关系,且各生育期的耗水量为花铃期>蕾期>吐絮期。

(3)不同生育期土壤水分阈值对棉花各处理单株铃重和衣分影响较小,花铃期土壤水分阈值对棉花单株铃数和籽棉产量影响较大,且呈现出(50%~80%) FC < (60%~90%) FC < (70%~

100%) FC ;在非需水关键期,降低土壤水分阈值有利于显著提升 WUE ,而增加土壤水分阈值反而会降低 WUE 。

(4)基于熵权-TOPSIS 的综合评价表明 W6 处理最优,当土壤水分传感器埋设在植株正下方 30 cm 处时,建议北疆地区膜下滴灌棉花蕾期、花铃期、吐絮期的土壤水分阈值可分别设为(60%~90%) FC 、(70%~100%) FC 、(50%~80%) FC 。此外,本研究仅考虑了 1 年不同土壤水分阈值对各生育期内棉花生长指标、耗水指标及产量的影响,对不同气候、土壤质地和肥力情况的适用性有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 赛力汗·赛. 滴灌量调配对北疆冬小麦耗水特性及产量形成的影响研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
- [2] 出合拉·窝坎,陈星,张其成. 新疆水资源可持续利用与影响因素分析[J]. 江西农业学报,2023,35(5):144-155.
- [3] 李池,陈刚,梁国成,等. 基于熵权-TOPSIS 的滴灌春玉米灌水定额研究[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(2):216-224.
- [4] 吴春辉. 新疆农业节水灌溉现状分析[J]. 吉林水利,2019(3):39-41+44.
- [5] 黄程琪. 新疆农业水资源利用效率及影响因素分析[D]. 石河子:石河子大学,2019.
- [6] 汪江涛. 新疆棉花不同灌溉方式对产量形成及水分利用效率的影响[D]. 石河子:石河子大学,2020.
- [7] 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.
- [8] LI Haifeng, QI Zhiming, GUI Dongwei, et al. Water use efficiency and yield responses of cotton to field capacity-based deficit irrigation in an extremely arid area of China [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(6): 91-101.
- [9] JAMROEN C, KOMKUM P, FONGKERD C, et al. An intelligent irrigation scheduling system using low-cost wireless sensor network toward sustainable and precision agriculture [J]. IEEE Access, 2020, 8: 172756-172769.
- [10] 鲁旭涛,张丽娜,刘昊,等. 智慧农业水田作物网络化精准灌溉系统设计[J]. 农业工程学报,2021,37(17):71-81.
- [11] 王东旺,王振华,张金珠,等. 滴灌带布置模式对北疆机采棉生长及土壤水热盐分布特征的影响[J]. 农业工程学报,2022,38(S1):76-86.
- [12] 王秀媛,马卉,高宏云,等. 新疆北部棉花冠层结构特征对滴灌定额的响应[J]. 应用生态学报,2019,30

- (12):4169-4176.
- [13] 李志鹏,万素梅,胡守林,等.不同灌水频率和灌溉定额对南疆无膜棉蕾铃时空分布及产量形成的影响[J].棉花学报,2022,34(5):383-400.
- [14] 熊丽.2022年全国棉花产量增长4.3%[N].经济日报,2022-12-27(4).
- [15] 张妮,左强,石建初,等.ANSWER模型评估新疆咸水灌溉棉花产量与效益[J].农业工程学报,2023,39(2):78-89.
- [16] FALLAHI H, TAHERPOUR KALANTARI R, AGHHA-VANI-SHAJARI M, et al. Effect of super absorbent polymer and irrigation deficit on water use efficiency, growth and yield of cotton [J]. *Notulae Scientia Biologicae*, 2015, 7(3): 338-344.
- [17] 成厚亮,张富仓,李萌,等.不同生育期土壤基质势调控对棉花生长和土壤水盐分布的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):211-221.
- [18] 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.
- [19] 潘俊杰,付秋萍,阿布都卡依木·阿布力米提,等.蕾期和花铃期不同灌水下限对滴灌棉花产量的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(5):27-32.
- [20] 李彦,雷晓云,白云岗.不同灌水下限对棉花产量及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(4):132-134.
- [21] 王凤姣,王振华,张金珠,等.水分传感器位置及灌水阈值对膜下滴灌棉花生理指标及产量的影响[J].节水灌溉,2018(5):14-19+25.
- [22] 高阳,刘战东,段爱旺,等.农田土壤剖面水分探头布设及数据处理技术研究[J].灌溉排水学报,2011,30(5):28-32.
- [23] 杨广,雷杰,孔春贤,等.膜下滴灌水源矿化度对棉花生长的影响及 AquaCrop 模拟[J].农业工程学报,2022,38(21):83-92.
- [24] 杜江涛.基于气象信息的南疆膜下滴灌棉花灌溉制度优化及其模拟[D].阿拉尔:塔里木大学,2021.
- [25] 龚丽芳,吴泽俊,陈欢.基于因子分析和熵权法的赣州市水资源承载力研究[J].水利规划与设计,2021(2):46-50+73.
- [26] 曲俊杉,洪明,常浩,等.水氮供应对北疆春玉米产量、水氮利用及品质的影响[J].玉米科学,2023,31(2):125-135.
- [27] 何平如.土壤水分调控对南疆滴灌棉花生长及土壤水盐肥运移的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [28] 姬清元,张富仓,肖超,等.土壤水分调控对棉花生长和土壤水盐分布的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(1):40-50+74.
- [29] HE Pingru, LI Jingang, YU Shuang'en, et al. Soil moisture regulation under mulched drip irrigation influences the soil salt distribution and growth of cotton in southern Xinjiang, China[J]. *Plants (Basel)*, 2023, 12(4): 791.
- [30] 忠智博,翟国亮,邓忠,等.水氮施量对膜下滴灌棉花生长及水氮分布的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(1):67-76.
- [31] 艾鹏睿.干旱绿洲区滴灌枣树最优调亏灌溉模式与施肥制度研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.
- [32] HIMANSHU S K, ALE S, BORDOVSKY J P, et al. Assessing the impacts of irrigation termination periods on cotton productivity under strategic deficit irrigation regimes [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 20102.
- [33] 郭金强,危常州,侯振安,等.北疆棉花膜下滴灌耗水规律的研究[J].新疆农业科学,2005(04):205-209.
- [34] 付恒阳,姬国斌.干旱区膜下滴灌棉花需水规律及灌溉制度研究[J].人民黄河,2016,38(1):144-148.
- [35] 宋娟娟,高晓东,蔡耀辉,等.灌溉方式对旱区农田温室气体排放影响的 Meta 分析[J].灌溉排水学报,2023,42(8):63-72.
- [36] LIANG Fubin, CHEN Meizhi, SHI Yuan, et al. Single boll weight depends on photosynthetic function of boll-leaf system in field-grown cotton plants under water stress [J]. *Photosynthesis Research*, 2021, 150(1-3): 227-237.
- [37] WANG Jiangtao, DU Gangfeng, TIAN Jingshan, et al. Effect of irrigation methods on root growth, root-shoot ratio and yield components of cotton by regulating the growth redundancy of root and shoot [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 234: 106120.
- [38] 张迎春,张富仓,范军亮,等.滴灌技术参数对南疆棉花生长和土壤水盐的影响[J].农业工程学报,2020,36(24):107-117.
- [39] BORDOVSKY J P, MUSTIAN J T, RITCHIE G L, et al. Cotton irrigation timing with variable seasonal irrigation capacities in the Texas South Plains [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2015, 31(6): 883-897.