

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

何平如^{1,2}, 张富仓^{1,2}, 范军亮^{1,2}, 侯翔皓^{1,2},
刘翔^{1,2}, 张迎春^{1,2}, 薛占琪^{1,2}

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100)

摘要:针对南疆地区水资源短缺、棉田水分利用效率低等问题,研究膜下滴灌条件下土壤水分下限调控对棉花生长、产量、品质和水分利用效率的影响。以棉花品种新陆中 66 号为材料,以田间持水量(FC)为土壤水分上限,棉花生育期设置 85%FC(T1)、75%FC(T2)、65%FC(T3)、55%FC(T4)和 45%FC(T5) 5 个土壤水分下限来调控土壤水分。结果表明:土壤水分下限的提升对株高和生物量有明显的促进作用,土壤水分下限从 45%FC 增至 85%FC,棉花株高和生物量分别增加了 25.80%和 25.38%;随着土壤水分下限的降低,灌溉定额减少,T1 处理灌溉定额最大(378 mm),T2、T3、T4、T5 处理与之相比分别节水 11.64%、33.07%、33.95%、46.83%;随着土壤水分下限的提升,棉花产量逐渐增大,但土壤水分下限过高,棉花单株有效铃数降低,产量增加不再明显,水分利用效率较低;土壤水分下限为 75%FC 时棉花单株有效铃数、单铃重增加,产量和水分利用效率分别达到 7 146.4 kg·hm⁻²和 1.40 kg·m⁻³;土壤水分调控对棉花纤维品质有显著影响,土壤水分下限越低,马克隆值越大,成熟度指数越高,断裂比强度和断裂伸长率减少,采用主成分分析法得出 T2 为棉花品质综合较优的处理。因此,建议在膜下滴灌方式下南疆盐碱地区棉花土壤水分下限控制在 75%FC 为宜,非生育期进行冬灌淋盐,冬灌定额为 300 mm,生育期灌溉定额为 334 mm,整个生育期灌水 12 次,灌水周期为 8 d。

关键词:滴灌;棉花;土壤水分调控;生长;品质;水分利用效率

中图分类号:S274.3;S562 **文献标志码:**A

Effects of soil moisture regulation on growth, quality and water use of cotton under drip irrigation in Southern Xinjiang

HE Pingru^{1,2}, ZHANG Fucang^{1,2}, FAN Junliang^{1,2}, HOU Xianghao^{1,2},
LIU Xiang, ZHANG Yingchun^{1,2}, XUE Zhanqi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Water-Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Considering the shortage of fresh water and the low water use efficiency of cotton fields in southern Xinjiang, an experiment was carried out to study the effects of lower limit regulation of soil water on growth, yield, quality, and water use efficiency of cotton under mulched drip irrigation. The No. 66 Xinluzhong was selected as the experiment variety, five lower soil water levels, which were 85%FC (T1), 75%FC (T2), 65%FC (T3), 55%FC (T4), and 45%FC (T5) were set, while FC, the field capacity, was used as the upper limit of soil water. The results showed that, the elevation in the lower soil water limit had an obvious promotion effect on plant height and biomass, as the lower soil water limit increased from 45%FC to 85%FC, the plant height and biomass of cotton increased by 25.80% and 25.38%, respectively. With the decrease in the lower soil water limit, the irrigation quota

decreased gradually, compared with T1 treatment, which had the largest irrigation quota (378 mm), that of T2, T3, T4, and T5 treatment saves about 11.64%, 33.07%, 33.95%, and 46.83%, respectively; With increasing the lower soil water limit, the yield of cotton increased gradually, but the lower soil water limit was too large, the number of effective bolls per plant decreased, the yield increase was no longer significant, and the water use efficiency was low. When the lower soil water limit was 75%FC, the number of effective bolls per plant and the single boll weight increased, the yield and water use efficiency reached $7\ 146.4\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $1.40\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The soil water regulation had significant effect on cotton fiber quality, the lower the lower soil water limit, the greater the Micronaire value, the higher the maturity index, and the lower the breaking strength and elongation rate. Using principal component analysis obtained the comprehensive and better treatment of cotton quality (T2). It is suggested that the lower soil water limit under mulched drip irrigation of cotton in saline alkali area of Southern Xinjiang should be controlled at 75%FC, and the winter irrigation should be carried out to leach salt in non-growing period. The winter irrigation quota should be 300 mm, the irrigation quota for growth period should be 334 mm, 12 times irrigation and 8 days cycle in the whole growth period.

Keywords: drip irrigation; cotton; soil moisture regulation; growth; quality; water use efficiency

新疆地处内陆干旱区,光热资源丰富,日照时间充足,2018年新疆棉花产量占全国总产量的84.9%,新疆棉区已发展成我国最大的商品棉生产基地^[1]。棉花收入占新疆农民收入的30%以上,南疆地区甚至达50%~70%^[2]。然而,新疆棉区干旱少雨,棉花生长所需水分主要依靠灌溉,因此,发展膜下滴灌技术,提高水分利用效率,制定科学合理的灌溉制度是促进新疆农业持续健康发展的重要措施^[3-5]。通过对土壤水分定量调控,可以实现适时适量灌溉,适宜水分下限在实际生产中有很大的指导意义^[6]。产量和品质的同步提高已成为当今节水农业追求的主要目标^[7],探究不同土壤水分下限调控对作物产量、品质和水分利用效率的影响对实现作物节水高效生产有重要的理论和实际意义。

20世纪90年代以来,国内外针对干旱区土壤水分下限调控、棉花灌溉制度等进行了大量研究。土壤水分下限值是土壤供给植物可利用水分的临界值^[8],根据土壤水分下限值可以确定作物的灌水时间、灌水定额和灌水次数^[9-10],土壤水分上限应接近田间持水量,下限略高于作物水分胁迫的含水率^[11]。根据文献查新,以滴灌灌溉控制指标的研究及应用主要应用于温室蔬菜或花卉等^[12-14]。近几年,有学者针对棉花灌水下限指标进行了研究,裴冬等^[15]、孟兆江等^[16]通过盆栽试验得出苗期土壤含水量应维持在50%~60%FC(田间持水量),蕾期和花铃期分别保持在65%FC和70%FC左右,吐絮期维持在50%~55%FC。汪昌树等^[17]、何平如等^[18]在南疆针对灌水下限指标进行的研究主要集中在棉花滴灌土壤水盐运移方面。李彦^[6]、申孝军等^[19]提出了石河子地区不同棉花生育期内适宜的灌水下限。潘俊杰等^[20]在新疆呼图壁县开展了不

同灌水下限的大田试验,通过 Logistic 模型模拟棉花的株高和生物量,得出棉花蕾期和花铃期适宜的灌水下限分别为65%FC和75%FC。郑旭荣等^[21]的研究结果表明:保持土壤含水率在50%~80%田间持水量可以得到较理想的棉花耗水分布。目前针对南疆盐碱化棉田土壤水分下限调控对棉花生长发育、产量、品质及水分利用效率的影响尚少见报道,本论文以田间持水量为土壤水分上限,梯次性选取不同土壤水分下限开展田间试验,采用 Logistic 曲线拟合棉花株高、生物量,应用主成分分析法评价棉花纤维综合品质,以节水增产调质为出发点,寻求基于水分-产量-品质响应关系的棉花灌溉制度,为优质高效种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于2018年4—10月在新疆库尔勒市尉犁县31团2连开展,试验区地理坐标为40°53'03"N,86°56'58"E,海拔900 m左右。属暖温带大陆性荒漠气候,多年平均降水量58 mm,年蒸发量2 417 mm,同期蒸发量约为降水量的50~80倍,平均气温11℃,昼夜平均温差14℃~15℃,多年平均日照时间2 941.8 h,无霜期180~220 d。试验田地表以下60 cm以砂壤土为主,60~100 cm以砂土为主。0~60 cm土层土壤平均容重 $1.57\ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量19.39%(质量含水率),0~100 cm土层土壤初始电导率为187~256 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 。试验区2018年棉花生育期内有效降雨仅为5.6 mm,平均地下水埋深为1.53 m,水面蒸发量在棉花播后30~70 d较高。

1.2 试验设计

供试作物为棉花(新陆中 66 号),以 FC(田间持水量)为土壤水分上限,按计划湿润层 FC 的不同百分比作为土壤水分下限指导灌溉,试验共设置 5 个灌水处理,控制土壤水分下限分别为 85% FC(T1)、75% FC(T2)、65% FC(T3)、55% FC(T4)、45%

FC(T5),每个试验处理设 3 次重复,共 15 个小区。采用一膜两管四行的毛管布置方式,滴头间距为 30 cm,滴头流量为 2.4 L · h⁻¹,棉花种植行距为 10 cm × 66 cm × 10 cm,株距 10 cm(图 1)。小区长 9 m,宽 6 m,各小区之间设置 1 m 宽保护行,每个小区面积为 60 m²。

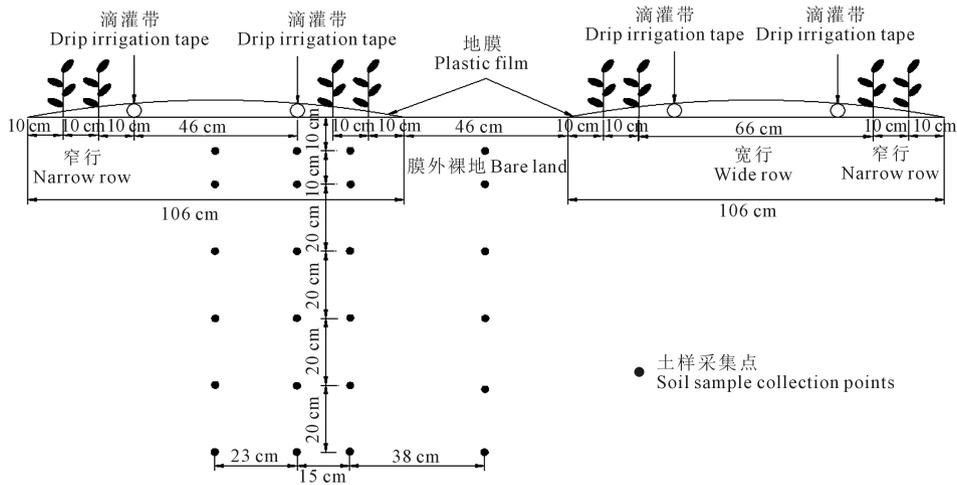


图 1 棉花种植模式及土样采集点位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of cotton planting mode and soil sample collection points

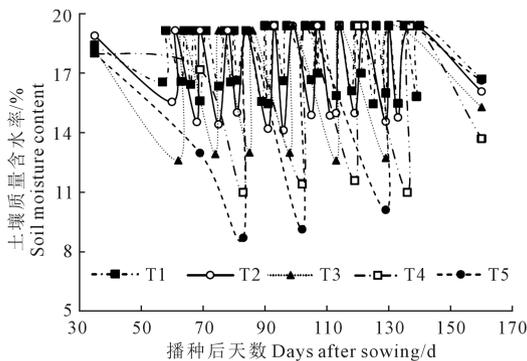


图 2 2018 年不同处理土壤含水率变化

Fig.2 Changes of soil water content of different treatments in 2018

试验地于 2017 年在秋收后进行冬灌,冬灌定额为 3 000 m³ · hm⁻²。棉花生育期内采用膜下滴灌方式进行灌溉,灌水量及灌水时间根据土壤水分控制下限确定,棉花计划湿润层的土壤含水率在播种后的变化如图 2 所示,2018 年不同处理的田间灌水方案见表 1。控制各试验处理棉花生育期内施肥水平一致,肥料均采用文丘里施肥罐随水施入,棉花蕾期、花期、铃期、吐絮期的施肥量占总施肥量(N 300 kg · hm⁻², P₂O₅ 120 kg · hm⁻², K₂O 60 kg · hm⁻²)的比例分别为 25%、30%、30%、15%,其他田间管理措施(打顶、打药、除草等)均与当地传统种植模式保持一致。

表 1 不同处理田间灌水方案

Table 1 Scheme of irrigation in the field for different treatments

处理 Treatment	灌溉定额/mm(灌水次数) Irrigation quota/mm (irrigation times)					灌溉定额 Irrigation quota/mm	灌水次数 Irrigation times
	苗期 Seedling stage (04-11-06-05)	蕾期 Budding stage (06-06-06-30)	花期 Flowering stage (07-01-07-25)	铃期 Boll-forming stage (07-26-08-19)	吐絮期 Boll-bearing stage (08-20-09-20)		
T1	15(1)	13(6)	19(6)	19(7)	19(2)	378	22
T2	15(1)	21(3)	32(3)	32(4)	32(1)	334	12
T3	15(1)	29(2)	45(2)	45(2)	0	253	7
T4	15(1)	38(1)	58(1)	58(1)	58(1)	227	5
T5	15(1)	46(1)	70(1)	70(1)	0	201	4

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤含水率的测定及灌水量的计算 土壤含水率均采用传统的烘干法测定,在试验田按 4 钻 6 层法(见图 1)取土样,取土样时以滴头为中心,在宽行、滴灌带、窄行及膜外裸地,分别取 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm 和 80~100 cm 土层土壤,试验期间不间断监测,出现降雨情况加测,当各试验处理计划湿润层的土壤含水率小于控制下限即进行灌溉。

根据棉花各生育期设定的土壤水分上、下限,计算灌水定额,棉花各生育期灌水定额计算公式^[22]:

$$M = 10 \times \gamma \times H \times p \times (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \quad (1)$$

式中, M 为各生育期灌水定额(mm); γ 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H 为土壤计划湿润层厚度,蕾期取 40 cm,花期、铃期与吐絮期取 60 cm; p 为湿润比,取 0.7; θ_{\max} 为田间持水量, θ_{\min} 为测定土壤含水率。

1.3.2 株高与地上部干物质的测定 待棉花出苗后,在各小区分别选取 10 株具有代表性的棉花植株挂牌观测,自蕾期开始每间隔 10 d 记录作物的株高。在每个小区内自蕾期开始每间隔 10 d 随机选取 5 株具有代表性的棉花,从茎基部与地上部分离,采样后分离植株各器官,分别放入 105℃ 恒温箱中杀青 30 min,于 75℃ 烘干至恒重,称量各部分干重并计算地上部干物质。

应用 Logistic 曲线对不同土壤水分下限处理株高和地上部干物质累积量进行拟合,Logistic 函数表达式^[20]:

$$F = \frac{K}{1 + ae^{-bt}} \quad (2)$$

式中, K 为最大株高 H_m (cm)或最大干物质 B_m (g), F 为因变量株高(H)或地上干物质(B), t 为播后天数(d), a 、 b 为经验系数。对 Logistic 方程求一阶导函数,得式(3)。

$$V = \frac{Kabe^{-bt}}{(1 + ae^{-bt})^2} \quad (3)$$

式中, V 为株高生长速率($\text{cm} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)或干物质积累速率($\text{g} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。求解 Logistic 方程的二阶导函数,并令其等于 0,得干物质积累速率最快的时间点为:

$$t = \frac{\ln a}{b} \quad (4)$$

带一阶导函数得最大速率:

$$V_m = \frac{Kb}{4} \quad (5)$$

求解 Logistic 方程三阶导函数并令其等于 0,得株高或地上干物质快速积累开始时间(t_1)和结束时间(t_2)。

$$t_1 = \frac{\ln a - \ln(2 + \sqrt{3})}{b} \quad (6)$$

$$t_2 = \frac{\ln a - \ln(2 - \sqrt{3})}{b} \quad (7)$$

同时得株高或地上干物质快速积累持续时间:

$$GT = t_2 - t_1 \quad (8)$$

1.3.3 籽棉产量 试验结束后在各小区随机选取 1.52 m²(长 1.0 m×宽 1.52 m)区域采摘棉花,每个小区重复 3 次。在该区域内测定棉花株数和总有效铃数,计算单株有效铃数和收获密度;随机选取试验田不同高度(中上-中-下层)的棉絮共 30 朵,计算单铃重;最后估算棉花籽棉产量。

1.3.4 水分利用效率 水分利用效率(WUE)计算^[22]:

$$WUE = Y/ET \quad (9)$$

式中, Y 为籽棉产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET 为作物全生育期内累积耗水量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.5 作物耗水量的计算 作物耗水量通过水量平衡法得到^[23]:

$$ET = P_y + U + I - D - R - \Delta W \quad (10)$$

式中, P_y 为有效降雨量(mm); U 为地下水补给量(mm); I 为灌水量(mm); D 为深层渗漏量(mm); R 为地表径流量(mm); ΔW 为试验初期和试验末期 0~100 cm 土层土壤水分的变化量(mm),可由试验获得。由于试验区干旱少雨,地势平坦,滴灌单次灌水量较少,无法形成地表径流,取 $R = 0$;根据试验区地下水埋深和水面蒸发资料,结合阿维里扬诺夫公式^[24-26]计算棉花生育期内的地下水补给量 $U = 144.86$ mm;由于每次膜下滴灌定额较小,不会产生深层渗漏,取 $D = 0$ 。本文试验田水量平衡方程如下:

$$ET = P_y + U + I - \Delta W \quad (11)$$

1.3.6 品质测定 棉花收获后委托农业部棉花品质监督检验测试中心对棉花纤维品质进行测定。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2016 以及 Origin 2017 绘图并统计分析试验所得数据,利用 SPSS 20.0 对试验数据进行显著性方差分析和回归分析,采用主成分分析法对棉花纤维品质各指标进行综合分析。

2 结果与分析

2.1 土壤水分下限调控对棉花株高和干物质累积量的影响

土壤水分下限调控对棉花株高和干物质累积量的影响见图3,棉花生育期内各处理地上部干物质累积速率均在苗期和蕾期较小,在花期和铃期增长速率较高,在吐絮期趋于稳定。Logistic 函数能很好地拟合不同水分处理条件下株高和干物质随生长天数的变化,株高拟合的 $R^2 > 0.97$,干物质质量拟合的 $R^2 > 0.99$,表明 Logistic 曲线能够较好地反映株高和地上部干物质质量的生长过程。棉花在播后 100 d 进行打顶,打顶后棉花株高增长缓慢,因此采用 Logistic 曲线只模拟了播后 0~100 d 的株高生长状况。由拟合方程可知(表2),棉花株高快速生长期从播后 45 d 左右(苗期)开始到播后 75 d 左右(蕾期)结束,各处理大致在第 60 天左右(蕾期)株高生长速

率达到最大。提高土壤水分下限有利于植株生长,打顶前 T1 处理植株高达 85.33 cm,分别比 T2、T3、T4、T5 高 2.68%、5.37%、13.43%和 25.80%,T1 处理土壤水分下限高,对应棉花根系层土壤水分充足,植株生长茂盛。T5 处理在灌水前长期处于水分亏缺状态,作物受水分胁迫,作物生长受到抑制,受旱严重,株高仅 67.83 cm。

由拟合方程可知,棉花地上部干物质质量快速积累期从播后 85 d 左右(花期)开始到播后 125 d 左右(铃期)结束,各处理大致在第 105 天左右(铃期)地上部干物质积累速率最大。提高土壤水分下限,地上干物质积累量增大,T1 处理地上干物质积累量最大,相比于 T2、T3、T4 和 T5 增加了 2.10%、10.73%、18.29%、25.38%。T5 处理进入 t_1 的时间较其他处理分别提前了 6.5、4.31、3.13、0.08 d,进入 t_2 的时间较其他处理分别提前了 5.96、6.05、4.87、1.82 d,说明降低土壤水分下限,棉花受旱,棉花生育进程加快,生育期缩短,不利于生物量的积累。

表2 棉花株高与播种后天数的 Logistic 函数拟合

Table 2 Fitting relation of cotton plant height and days after sowing by Logistic function

处理 Treatment	t_1	t_2	t	V_m	GT	回归方程 Regression	R^2
T1	45.54	76.53	61.04	1.81	30.99	$Y = 85.33(1 + 179.11e^{-0.085t})^{-1}$	0.982
T2	46.57	76.16	61.36	1.85	29.59	$Y = 83.10(1 + 235.44e^{-0.089t})^{-1}$	0.974
T3	48.86	78.79	63.82	1.78	29.93	$Y = 80.98(1 + 274.94e^{-0.088t})^{-1}$	0.972
T4	45.99	75.25	60.62	1.69	29.27	$Y = 75.23(1 + 243.09e^{-0.090t})^{-1}$	0.983
T5	43.56	75.29	59.42	1.41	31.73	$Y = 67.83(1 + 138.66e^{-0.083t})^{-1}$	0.973

表3 棉花干物质质量与播种后天数的 Logistic 函数拟合

Table 3 Fitting relation of cotton dry biomass and days after sowing by Logistic function

处理 Treatment	t_1	t_2	t	V_m	GT	回归方程 Regression	R^2
T1	88.68	126.31	107.49	2.03	37.63	$Y = 116.11(1 + 1852.70e^{-0.07t})^{-1}$	0.991
T2	86.49	126.40	106.44	1.88	39.91	$Y = 113.72(1 + 1124.70e^{-0.066t})^{-1}$	0.997
T3	85.31	125.22	105.26	1.73	39.91	$Y = 104.86(1 + 1040.50e^{-0.07t})^{-1}$	0.995
T4	82.26	122.17	102.22	1.62	39.91	$Y = 98.16(1 + 850.95e^{-0.07t})^{-1}$	0.998
T5	82.18	120.35	101.26	1.63	38.17	$Y = 92.61(1 + 1081.73e^{-0.07t})^{-1}$	0.991

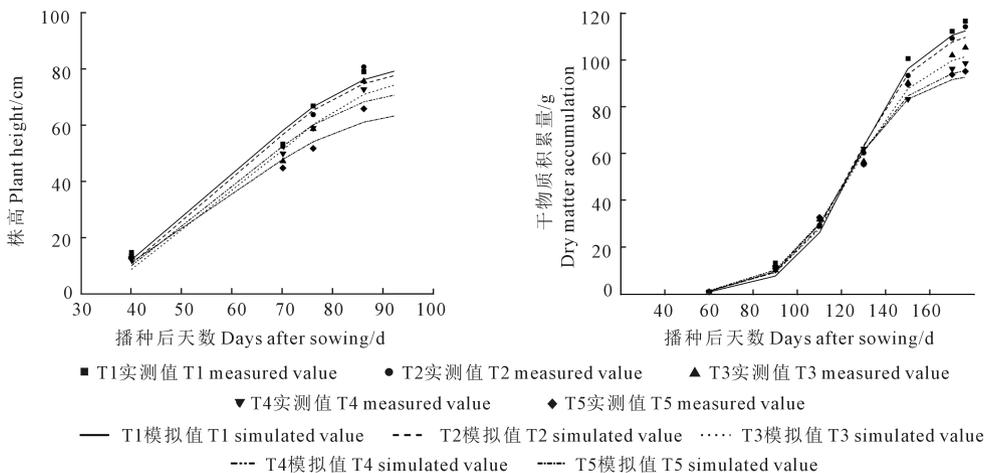


图3 土壤水分下限调控对棉花株高和干物质累积量的影响及 Logistic 函数拟合

Fig.3 Effects of different soil water regulation on plant height and aboveground dry biomass and fitting of Logistic function

整体来看,棉花株高快速生长结束在播后 75~78 d,棉花地上部干物质量快速积累期在播后 82~88 d,植株在结束株高的快速增长后再进入地上部物质量的快速积累,说明此时植株从营养生长转向生殖生长。株高快速积累期持续时间 T1 和 T5 处理较 T2、T3、T4 处理长,地上部干物质量快速积累期持续时间 T1 和 T5 处理较 T2、T3、T4 处理短,说明 T1、T5 促进了棉花的营养生长。

2.2 土壤水分下限调控对棉花产量及水分利用效率的影响

不同土壤水分下限对棉花产量及水分利用效率的影响见表 4,不同土壤水分下限对棉花籽棉产量、耗水量、WUE 均有显著的影响。棉花的产量受单株有效铃数、单铃重、收获密度等因素的综合影响。由表 4 可看出,各产量构成因子在不同灌水处理下差异明显。T2 处理棉花单株有效铃数最大,相比 T1、T3、T4、T5 处理高 12.56%、11.85%、18.59%、16.63%。T5 处理棉花单铃重最小,其余各处理单铃重无明显差异。T1 处理收获密度较大,其余各处理收获密度无明显差异。不同土壤水分下限处理的棉花最终产量为 T1>T2>T3>T4>T5,其中,T1 处理籽棉产量高达 7 233.2 kg·hm⁻²,相比 T2、T3、T4、T5 处理分别增加 1.21%、9.97%、18.05%和 20.78%,T1 与 T2 处理间产量没有显著性差异,土壤水分下限为 85%FC 和 75%FC 时,棉花产量较高。随着土壤水分下限的降低,灌溉定额逐渐减少,T1 处理灌溉定额最大(378 mm),T2、T3、T4、T5 处理与之相比分别节水 11.64%、33.07%、33.95%、46.83%;随着土壤

水分下限的增大,棉花耗水量逐渐增大;T5 处理的水分利用效率最高,为 1.63 kg·hm⁻²,相对 T1、T2、T3 和 T4 处理增加 28.35%、16.43%、7.95%和 9.40%。说明棉花产量随着土壤水分下限的增大逐渐增大,水分利用效率均随着土壤水分下限的增大逐渐降低。

2.3 土壤水分下限调控对棉花纤维品质的影响

在评价棉花纤维品质优劣的过程中,通过单一指标无法对棉花纤维品质进行判别,因此,采用主成分分析法对表 5 中 8 个指标进行综合分析,评价出相对较优的灌溉处理。由于各指标具有不同的量纲和数量级,为了保证结果的可靠性,需要对数据进行标准化处理。由于棉花断裂伸长率大于 7 时数值越小棉花品质越好,马克隆值大于 4.2 时数值越小棉花品质越好,短纤维指数和成熟度指数越小棉花品质越好^[27],本文先取棉花的马克隆值、断裂伸长率、成熟度指数和短纤维指数为负数,然后再进行标准化。参考王伟娜等^[28]的计算方法,按如下原则选择主成分:将特征值大于 1.0 或累积方差贡献率大于 85%的因子数定为主成分个数,该因子即为主成分。分析标准化后的数据,得到主成分的特征值、贡献率和累积贡献率(表 6)。

通过分析,前两个成分特征值均大于 1.0,可作为主成分。各指标与第 1 主成分的关系为: $F_1 = 0.216X_1 - 0.028X_2 - 0.2X_3 - 0.25X_4 + 0.147X_5 + 0.198X_6 + 0.246X_7 - 0.067X_8$,与第 2 主成分的关系为 $F_2 = 0.156X_1 + 0.334X_2 + 0.214X_3 + 0.082X_4 + 0.184X_5 + 0.049X_6 + 0.098X_7 + 0.331X_8$,其中, X_1 、 X_2 、

表 4 土壤水分下限调控对棉花产量和水分利用效率的影响

Table 4 Effects of soil water lower limit regulation on cotton yield and water use efficiency

处理 Treatment	单株有效铃数 Effective bolls per plant	单铃重/g Boll weight	收获密度/(×10 ⁴ ·hm ⁻²) Harvested density	籽棉产量/(kg·hm ⁻²) Lint Yield	耗水量/mm Water consumption	WUE /(kg·m ⁻³)
T1	6.29ab	5.26a	25.72a	7233.2a	568.0a	1.27c
T2	7.08a	5.24a	22.66b	7146.4a	509.0b	1.40bc
T3	6.33ab	5.24a	23.33b	6577.6ab	436.0c	1.51b
T4	5.97b	5.25a	23.00b	6127.4b	412.3cd	1.49b
T5	6.07b	5.12b	22.67b	5988.7b	366.6d	1.63a

注:处理间不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different letters indicate the significant difference among different treatment ($P<0.05$), the same below.

表 5 土壤水分下限调控对棉花纤维品质的影响

Table 5 Effects of lower soil water limit regulation on cotton fiber quality

处理 Treatment	上半部平均长度 Average length of the top half/mm	长度整齐度指数 Length uniformity index/%	断裂比强度 Breaking strength / (cN·tex ⁻¹)	断裂伸长率 Elongation rate/%	马克隆值 Micronaire	短纤维指数 Short fiber index/%	成熟度指数 Maturity index	纺织一致性指数 Textile consistency index
T1	31.65b	87.1b	25.3c	12.1a	4.74ab	4.0b	0.83b	137b
T2	32.69a	89.0a	27.5b	11.6a	4.74ab	3.6c	0.83b	153a
T3	31.07bc	88.8a	27.5b	10.3b	4.65b	3.9bc	0.84ab	150a
T4	31.22bc	88.5a	29.6a	10.5b	4.81ab	4.6a	0.84ab	154a
T5	30.84c	87.6b	27.4b	10.5b	5.00a	4.1b	0.85a	141b

X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 分别表示上半部平均长度、长度整齐度指数、断裂比强度、断裂伸长率、马克隆值、短纤维指数、成熟度指数、纺织一致性指数。综合评价公式为: $F = 3.627F_1 + 2.905F_2$ 。将表6中的标准化值对应带入主成分公式和综合评价公式中,得出不同灌溉制度下棉花品质指标的综合评价价值(表7)。综合评价结果表明,棉花纤维品质依次为 $T2 > T1 > T3 > T4 > T5$ 。

表6 棉花纤维主成分特征值、贡献率和累积贡献率

Table 6 Eigenvalue, contribution rate and cumulative contribution rate of main principle components of cotton fiber

成分 Component	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累积贡献率/% Cumulative contribution rate
1	3.627	45.334	45.334
2	2.905	36.316	81.650
3	0.769	9.615	91.265
4	0.699	8.735	100.000

表7 主成分分析法评价棉花纤维品质综合指标分数与排名
Table 7 Evaluation of comprehensive cotton fiber quality index score and rank by the principal component analysis

处理 Treatment	F_1 值 F_1 value	F_2 值 F_2 value	F 值 F value	排序 Rank
T1	1.110	-1.104	0.820	2
T2	0.984	1.010	6.501	1
T3	-0.225	0.553	0.788	3
T4	-0.978	0.592	-1.826	4
T5	-0.891	-1.051	-6.284	5

3 讨论

研究表明,滴灌条件下土壤水分下限调控对棉花生长、产量、品质及水分利用效率有显著的影响。Logistic 方程已广泛用于模拟水稻^[29]、玉米^[30]、棉花^[31]株高或者生物量的生长过程,可以为田间灌水和作物生长预测提供指导。株高是衡量棉花生长状况的重要指标,也是反映作物营养生长和生殖生长协调程度的重要指标^[32]。Wang 等^[33]研究认为,棉花的株高随着灌水下限的增加而增加,低灌水下限会产生盐分胁迫,抑制植株的生长。刘素华等^[34]研究得出作物在调亏灌溉下营养生长会受到一定程度限制,体现在株高降低、生物产量也显著降低。本文研究结果与之相似,通过 Logistic 方程描述棉花植株的株高、地上干物质量随播后天数的变化,表明不同土壤水分下限处理间棉花株高、地上干物质量差异明显,提高土壤水分下限,株高和生物量显著增加。土壤水分下限过高(85%FC),棉花侧重于营养生长,产生旺长型棉花植株,不利于生物量的持续增高;土壤水分下限过低(45%FC),棉花受旱,

导致棉花生育进程加快,生育期缩短,产生生长不足型棉花植株,不利于生物量的积累。

李百凤等^[8]研究表明,土壤水分控制下限是影响作物产量的重要因素,土壤水分对作物生长过程影响最为密切,土壤水分不足首先表现在作物生物量积累相对缓慢,并最终体现在作物产量上。刘梅先等^[35]研究认为虽然滴灌水量少于 300 mm 可获得较高的水分利用效率,但作物减产严重,但过量滴灌也无明显增产效应。本文研究结果表明,随着土壤水分控制下限的降低,棉花产量逐渐减小,水分利用效率逐渐增大。土壤水分下限过高引起灌水量的增加,棉花侧重营养生长,产量未明显提高且不利于节水;土壤水分下限过低导致灌水量的减少,可以提高棉花对土壤水的吸收利用,提高水分利用效率,但植株受旱易发生早衰,导致棉花产量降低。这与蔡焕杰等^[36]的研究结果一致,他们认为长时间连续的水分亏缺会造成棉株代谢失调及生长速率下降,从而影响作物的经济产量,充分供水促使棉株旺长,棉株过早封行,透光透气条件变差,脱蕾、落花现象严重,从而造成了产量的降低。

随着人们生活水平的提高,品质的提升已成为当今节水农业追求的主要目标。主成分分析法在番茄^[37]、马铃薯^[38]、棉花^[39]等作物品质及性状评价中应用越来越广泛,主成分分析与评价是一种多元统计方法,采用主成分分析方法对棉花品质进行评价,可以在较少损失原有指标信息的情况下,将多个品质指标转换为一个品质综合主成分评价变量^[38]。在一定灌水量范围内,适度减少灌水量可增大马克隆值,断裂比强度会随着水分亏缺程度的升高而降低^[40]。本文结果与之相似,土壤水分调控显著影响棉花的纤维品质,土壤水分下限越低,灌水量越少,马克隆值越大,成熟度指数越高,断裂比强度和断裂伸长率减少。本文通过主成分分析法提取了2个主成分,包含原始数据 81.65%的变异信息,获得棉花品质综合较优的处理(T2)。

4 结论

土壤水分下限为 75%FC 时棉花单株有效铃数、单铃重和干物质量增加,棉花品质最好,可以至少获得最高皮棉产量的 98%,并节省 11%左右的灌水量,产量和水分利用效率分别达到 $7\ 146.4\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.40\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。因此,综合考虑提高棉花产量和品质的同时,达到节水的目的,建议南疆棉花生长的适宜灌水下限为 75%FC。初步得出南疆盐碱地膜下滴灌灌溉制度为:非生育期进行冬灌淋盐,冬

灌定额为 300 mm,生育期灌溉定额为 334 mm,蕾期灌水定额为 21 mm,花期、铃期及吐絮期灌水定额为 32 mm,整个生育期灌水 12 次,灌水周期为 8 d。

参考文献:

- [1] 国家统计局.国家统计局关于 2018 年棉花产量的公告[EB/OL]. (2019-12-17) [2020-05-15]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfh/201912/t20191217_1718007.html.
- [2] 田立文,徐海江,孔杰,等.新疆棉花持续发展对策优化分析[J].中国纤检, 2018,(9):110-113.
- [3] 刘芳婷,范文波,张金玺,等.膜下滴灌棉花土壤呼吸特征及其影响因素[J].排灌机械工程学报, 2018,36(8):767-772.
- [4] Wang H D, Wu L F, Cheng M H, et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in northern Xinjiang, China [J]. Field Crops Research, 2018, 219:169-179.
- [5] 范军亮,张富仓,吴立峰,等.滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性综合评价[J].农业工程学报, 2016,32(12):96-101.
- [6] 李彦.北疆滴灌棉田墒情监测点优化布设及灌水下限指标研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2014.
- [7] 李欢欢,刘浩,孙景生,等.水肥耦合对温室番茄产量,水分利用效率和品质的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(9):886-891.
- [8] 李百凤,冯浩,吴普特.作物非充分灌溉适宜土壤水分下限指标研究进展[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):227-231.
- [9] 冯亚阳,史海滨,李瑞平,等.膜下滴灌水氮耦合效应对玉米干物质与产量的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(8):750-755.
- [10] Campbell G S, Campbell M D. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice [J]. Advances in Irrigation, 1982,(1):25-42.
- [11] Hanson B R, Orloff S, Peters D. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management [J]. California Agriculture, 2000, 54(3):38-42.
- [12] 孙华银,康绍忠,胡笑涛,等.根系分区交替灌溉对温室甜椒不同灌水下限的响应[J].农业工程学报, 2008,24(6):78-84.
- [13] 王洪源,李光永.滴灌模式和灌水下限对甜瓜耗水量和产量的影响[J].农业机械学报, 2010,41(5):47-51.
- [14] 杨文斌,郝仲勇,王凤新,等.不同灌水下限对温室茼蒿生长和产量的影响[J].农业工程学报, 2011,27(1):94-98.
- [15] 裴冬,张喜英,亢茹.调亏灌溉对棉花生长、生理及产量的影响[J].生态农业研究, 2000, 8(4):54-57.
- [16] 孟兆江,卞新民,刘安能,等.调亏灌溉对棉花生长发育及其产量和品质的影响[J].棉花学报, 2008, 20(1):39-44.
- [17] 汪昌树,杨鹏年,姬亚琴,等.不同灌水下限对膜下滴灌棉花土壤盐运移和产量的影响[J].干旱地区农业研究, 2016,34(2):232-238.
- [18] 何平如,张富仓,侯翔皓,等.土壤水分调控对南疆滴灌棉花产量及土壤盐分分布的影响[J].水土保持研究, 2020,27(2):84-92.
- [19] 申孝军,张寄阳,孙景生,等.灌水模式及下限对滴灌棉花产量和品质的影响[J].排灌机械工程学报,2014,32(8):711-718.
- [20] 潘俊杰,付秋萍,阿布都卡依木·阿布力米提.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.
- [21] 郑旭荣,胡晓棠,李明思,等.棉花膜下滴灌田间耗水规律的试验研究[J].节水灌溉, 2000,(5):25-27.
- [22] 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.
- [23] Oweis T Y, Farahani H J, Hachum A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8):1239-1248.
- [24] 阿维里扬诺夫.防治灌溉土地盐渍化的水平排水设施[M].北京:中国工业出版社,1963.
- [25] 王伦平,陈亚新.内蒙古河套灌区灌溉排水与盐碱化防治[M].北京:水利电力出版社,1993.
- [26] 付秋萍,张江辉,王全九.常用潜水蒸发经验公式在新疆地区适用性研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):182-188.
- [27] 国家标准化委员会.GB 1103-2012 棉花细绒棉[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [28] 王伟娜,邵孝侯,程晋,等.灌溉水质水量对番茄影响的主成分分析[J].河海大学学报(自然科学版) 2014,42(4):372-376.
- [29] 俞双恩,张梦婷,陈凯文,等.灌排模式和施氮水平对水稻株高与茎蘖生长动态的影响[J].农业机械学报, 2019,50(11):210-218.
- [30] 严富来,张富仓,范兴科,等.基于空间分析的宁夏沙土春玉米最佳滴灌水氮管理模式[J].农业机械学报,2019,50(11):219-228.
- [31] 谭帅.微咸水膜下滴灌土壤盐调控与棉花生长特征研究[D].西安:西安理工大学, 2018.
- [32] 申孝军,张寄阳,刘祖贵,等.膜下滴灌条件下不同水分处理对棉花产量和水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):118-124.
- [33] Wang R S, Kang Y H, Wang S Q. Salt distribution and the growth of cotton under different drip irrigation regimes in a saline area [J]. Agricultural Water Management, 2011, 100(1):58-69.
- [34] 刘素华,彭延,彭小峰,等.调亏灌溉与合理密植对旱区棉花生长发育及产量与品质的影响[J].棉花学报,2016,28(2):184-188.
- [35] 刘梅先,杨劲松,李晓明,等.膜下滴灌条件下滴水量和滴水频率对棉田土壤水分分布及水分利用效率的影响[J].应用生态学报, 2011,22(12):3203-3210.
- [36] 蔡焕杰,邵光成,张振华.荒漠气候区膜下滴灌棉花需水量和灌溉制度的试验研究[J].水利学报,2002,(11):119-123.
- [37] 王英,张富仓,王海东,等.滴灌频率和灌水量对榆林沙土马铃薯产量、品质和水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2019,30(12):4159-4168.
- [38] Liu H, Li H H, Ning H F, et al. Optimizing irrigation frequency and amount to balance yield, fruit quality and water use efficiency of greenhouse tomato [J]. Agricultural Water Management, 2019, 226:1-12.
- [39] Basal H, Dagdelen N, Unay A, et al. Effects of deficit drip irrigation ratios on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield and fiber quality [J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2009, 195(1):19-29.
- [40] 万华龙,刘朋程,刘连涛,等.早期适度干旱对棉花产量、纤维品质及水分利用效率影响[J].棉花学报, 2018,30(6):464-472.