

干旱缺水区膜下滴灌棉花节水机理及灌溉制度研究

石 岩^{1,2,3}, 张金霞¹, 董平国², 成自勇¹, 石培泽²

(1. 甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 武威市水利技术综合服务中心, 甘肃 武威 733000;

3. 甘肃省兰州市大砂沟电力提灌工程管理处, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 在石羊河流域进行了一管多行的棉花膜下滴灌节水机理及灌溉制度试验研究。结果表明: G_1 方案(灌水定额为 $20, 15 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 和 $10 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$) 和 G_2 方案(灌水定额为 $20 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$) 的耗水量变化范围基本一致, 变化于 $247 \sim 276 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 。膜下滴灌棉花产量随灌水定额增加而增加, G_2 方案(灌水定额等于 $20 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$) 是膜下滴灌棉花的高产灌水定额。灌溉定额在 $80 \sim 90 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 以下时, 产量随灌溉定额呈直线增长, 灌水对棉花产量起决定性作用; 在 $90 \sim 115 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 时, 产量随灌溉定额呈曲线增长, 水的增产作用逐渐减缓; 大于 $115 \sim 120 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 时产量随灌溉定额的增加而减少。灌溉定额一定时毛管配置方式对棉花耗水量影响差异不大。一管三行略高于一管四行, 随灌溉定额的增加而增加, 耗水模数与灌溉定额呈逆向关系。不同灌溉定额下, 日蒸腾水量变化趋势一致, 即中期大前后期小。一管三行、一管四行两种灌溉方式均能达到高产水平, 毛管间距可扩大到 $80 \sim 100 \text{ cm}$, 毛管投入量比现状减少 $33\% \sim 50\%$, 是干旱缺水区膜下滴灌棉花节水高效的田间灌溉方式。现蕾期第一次灌水, 吐絮初期最后一次灌水, 棉铃期灌水 $2 \sim 4$ 次, 全生育期灌水 $4 \sim 6$ 次, 灌水定额 $20 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 灌溉定额 $80 \sim 120 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 的灌溉制度, 是一管多行的高产灌溉模式。土壤水分下限值保持在适当范围内(开花期之前 60% 以上, 棉铃期 $45\% \sim 60\%$, 吐絮期至收获期 50% 以下), 可满足作物营养生长和生殖生长对土壤水分的需求。

关键词: 膜下滴灌; 棉花; 毛管配置; 灌水定额; 干旱缺水区

中图分类号: S275.6 文献标志码: A

The study on watersaving mechanism and irrigation program with cotton drip irrigation under plastic film in drought and water shortage area

SHI Yan^{1,2,3}, ZHANG Jin-xia¹, DONG Ping-guo², CHENG Zi-yong¹, SHI Pei-ze²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Water Resources Technical Service Center, Wuwei, Gansu 733000, China;

3. Management Department of the Electric Power Irrigation Project, Dashagou, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: The experimental investigations on watersaving mechanism and irrigation program with cotton drip irrigation under plastic film have been done in the Shiyang River Basin. Results showed that: The water consumption with G_1 scheme was close to that with G_2 scheme, changed in $247 \sim 276 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$. The yield of cotton drip irrigation increased with the irrigation quota, and the G_2 scheme (the $20 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$) was the high yield irrigation quota for cotton under film drip irrigation. When the irrigation amount was below $80 \sim 90 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, the yield has a linear increase with the quota, which indicated that water played a crucial role in this stage. When that was $90 \sim 115 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, the yield has a curve increase with the quota, which showed that the increasing yield effect of water is gradually slowing down. When that was higher than $115 \sim 120 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, the less yield the more irrigation quota. At the same irrigation amount, the effects of tubular billet layout on cotton water consumption had no significant differences. A tube with three lines was slightly higher than a tube with four lines. With the increase of irrigation amount, the water consumption modulus and the irrigation quota were in reverse relationship. Under different irrigation amount, the daily transpiration showed the same trend, that is, big medium-term stage and small in the earlier and later stage. Both a tube with three lines and a tube

收稿日期: 2016-06-14

修回日期: 2016-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(51509039; 51369002); 甘肃省科技支撑计划项目(1204NKCA086); 甘肃农业大学工学院青年教师科技创新基金

作者简介: 石 岩(1987—), 男, 甘肃民勤人, 硕士, 研究方向为水利技术与水资源管理。E-mail: shipeize1@126.com.cn

通信作者: 张金霞(1976—), 女, 甘肃民勤人, 博士, 研究方向为农业节水和灌区荒漠化防治。E-mail: zhangjinxia@gsau.edu.cn

with four lines could reach to high yield level, which capillary spaces could be extended to 80–100 cm, and capillary inputs could be less 33%–50% than the current situation. So, both were water saving and high efficiency irrigation method for cotton at in drought and water shortage area. The irrigation system, which irrigation firstly at the squaring stage, lastly at the beginning of boll opening stage, 2–4 times at the boll stage (the key water requirement period for cotton), $20 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ each time, total 4–6 times and $80 \sim 120 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ at the whole growth period, was high yield irrigation mode. The lower value of soil moisture was kept in a suitable range (more than 60% before the flowering stage, 45%–60% at the boll stage, 50% between the boll opening to harvest stage), which could meet the needs of crop nutrition and reproductive growth on soil moisture.

Keywords: drip irrigation under film; cotton; lateral placements; irrigation quota; drought and water shortage area

扩大节水、高效、耐旱作物的种植比例^[1-4]、调整农业种植结构^[5-7]及进行农田覆盖^[8-11]是破解结构性缺水问题、促进农业可持续发展的重要措施。在干旱缺水区将地膜覆盖与滴灌两种技术相结合,更有利于作物产量和水分利用率的提高,可以达到提高地温、保水节水、优质高产的综合效应^[3]。而膜下滴灌就是将这两种技术相结合的一项节水灌溉新技术:滴灌系统将水供给作物根部的土壤,土壤团粒结构疏松而不被破坏,深层渗漏及肥料损失减少,同时地膜覆盖具有保墒增温作用,即减少了蒸发,又提高了农作物对水肥利用效率^[5]。调查显示,膜下滴灌与传统灌溉相比可节水 30%–50%,增产 20%–30%^[7]。所以,在生态脆弱和有限定额灌溉的石羊河流域,研究推广膜下滴灌技术具有重要的实际生产意义。

在膜下滴灌技术研究方面,国内学者主要侧重于研究一管两行或两管四行的需水规律^[12-13]、灌溉制度与作物节水机理^[14]、对作物生长发育和水肥利用效率的影响^[15]及节水灌溉模式^[16]、作物土壤水热盐运移规律^[17]等方面。艾先涛等^[18]调查发现,棉花的平均灌溉定额为 $300 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$,生育期灌水 12–14 次,灌水定额 $10 \sim 25 \text{ m}^3 \cdot 667 \text{ m}^{-2}$,增产 20%–50%。蔡焕杰等^[19]对高秆稀植棉花的研究结果表明,“一管四行”灌溉方式不同毛管间距对棉花产量和品质有较大影响。国内在大田滴灌作物方面毛管的配置多为一管两行或两管四行,毛管间距仅 40–60 cm,其毛管一项投入近 $1000 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$,

最多能使用 3 年,和畦灌相比虽然节水但投入产出比低,严重影响了群众推广滴灌的积极性;在滴灌工程运行方面,灌水次数多,灌水定额变化范围大,灌溉定额高,影响了滴灌工程正常安全运行和效益的发挥;在研究方面对大田滴灌密植作物、一管多行(3 行及以上)的高效灌溉方式、适宜灌水定额、节水机理及节水相应的高产灌溉制度研究国内未见过相关报道,所以进行一条毛管控制灌溉多行作物的膜下滴灌模式及其高产灌溉制度的研究是非常必要的。

本文针对石羊河流域干旱缺水、生态脆弱和一管两行的膜下滴灌投入高、推广难等实际问题,基于膜下滴灌棉花研究一管多行的高效灌溉方式、适宜的毛管(滴灌管)配置方式和灌水定额,提出既可大幅度减少投入又可达高产丰产水平的节水高效膜下滴灌模式。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在甘肃民勤县小坝口灌溉试验站(位于北纬 $38^{\circ}31'$,东经 $105^{\circ}01'$,高程为 1 380 m 左右),土壤属砂壤土,透水性中等。采用地下水灌溉,矿化度 $1.2 \sim 1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,埋深 28–33 m。区内气候干旱,降雨稀少,年均降水量 110 mm,主要集中于 7–9 月,年蒸发量 2 600 mm。作物生长期日照时间长,昼夜温差大,无霜期 158 d。0–100 cm 土层内容重随深度而增大,平均容重为 $1.49 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;孔隙度 42.76%,田间持水率为 21.83%(表 1)。

表 1 甘肃民勤县小坝口灌溉试验站土壤物理性质

Table 1 The soil physical properties in Xiaobakou irrigation experimental station, Minqin, Gansu Province

土层深度 Soil depth/cm	0~20	0~40	0~60	0~80	0~100
容重 Bulk density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.315	1.357	1.421	1.459	1.487
比重 Specific weight/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.621	2.605	2.614	2.603	2.603
孔隙度 Porosity/%	49.820	47.875	45.650	43.928	42.868
田间持水率 Field capacity/%	22.100	21.810	21.617	21.720	21.816

1.2 试验方案与设计

试验作物:棉花,种植品种为“新陆早7号”。

滴灌工程布设:水源为井水+蓄水池。输水系统采用干支毛三级管道输水,干管首部安装控制阀门、压力表;支管首端安装阀门,并安装水表监控水量;毛管采用直径16 mm的滴灌管,内镶式滴头,滴头间距为30 cm,运行压力调控在 $1.5 \sim 2 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之间,滴头流量 $3 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ [20]。

试验设计:试验选择毛管配置、灌溉定额、灌水定额三个控制因素,采用三因素不等水平设计试验,如表2所示。按毛管配置方式设两种,一管四行(R_1):指一条毛管控制灌溉四行作物;一管三行(R_2):指一条毛管控制灌溉三行作物。毛管间距(加通风作业带20 cm)分别为80 cm、100 cm(如图1所示)。灌溉定额设5个水平:分别是120(W_1)、100(W_2)、80(W_3)、60(W_4)和40(W_5) $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 。灌水定额分两类实施,一类(G_1)设三个水平:分别是20、15 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 和10 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$;另一类(G_2)设一个水平:是20 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 。依据多年的大田棉花的试验成果资料[5],灌水时间以作物生育期确定, G_1 类

第一次灌水时间设在开花初期、最后一次灌水设在吐絮期; G_2 类第一次灌水时间设在现蕾期、最后一次灌水设在吐絮初期;另外两类灌溉制度在开花期、吐絮初期各灌一次水,在棉铃期依据灌溉定额灌水1~3次(注:根据降水适时调整灌水时间和灌水量,当次降水大于20 mm可减少一次灌水。生育“初期”是指10%的作物进入该期;生育“期”是指50%的作物进入该期)。综上共设定8种棉花灌溉制度实施方案,将毛管配置方式与灌溉制度组合设共16个处理(表3),3次重复,共计48个试验小区。另外, G_2 类灌溉制度试验年9月4日降水27 mm,各处理吐絮初期未进行最后一次灌水,实际灌溉定额40~100 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 。4月中旬播种,为确保出苗条件一致,播种时灌水定额都为80 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,播种量约8 $\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$ 。施底肥:磷酸二铵和尿素(含N $\geq 46.3\%$)各13 $\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,复合肥25 $\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$ 。滴灌第一次水(现蕾期或开花初期)、第三次水(棉铃期)时分别施尿素10.5 $\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$ 。各个小区的施肥施药、播种、耕作、锄草等农艺措施均相同。棉花行距20 cm,种植保苗密度1.2万株 $\cdot 667\text{m}^{-2}$ 以上。

表2 膜下滴灌棉花试验因素水平

Table 2 Test factor levels of cotton by drip irrigation under film

因素水平 Factor level	毛管配置 Lateral tube layout		灌水定额 Irrigation quota/ $(\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2})$		灌溉定额 Irrigation norm/ $(\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2})$	
1	一管三行 One tube with three lines	R_1	20、15、10	G_1	120	W_1
2	一管四行 One tube with four lines	R_2	20	G_2	100	W_2
3					80	W_3
4					60	W_4
5					40	W_5

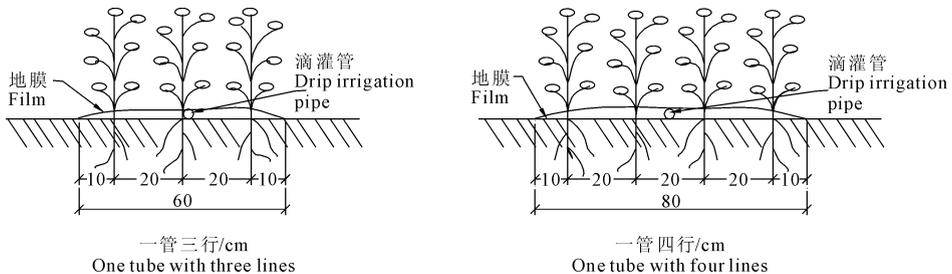


图1 棉花膜下滴灌毛管配置形式

Fig.1 Layout form of lateral tube for cotton by drip irrigation

1.3 测试项目与方法

从播种开始日常的观测:记录播种时间、播种量、出苗情况、出苗数和各生育阶段的进入时间和最终收获时间。记录全生育期的灌溉时间,灌水次数,灌水量;灌水量由水表控制。

土壤水分测定:0~20 cm内土层采用烘干法、其余土层采用中子仪测定,观测深度为100 cm,间距

为20 cm。一管三行的处理中各小区埋设2根中子管,分别埋设在毛管下方和左测二行植株之间;一管四行的处理中各小区埋设3根中子管,分别埋设在毛管下方和内外植株之间。作物蒸发蒸腾量采用水量平衡法计算,相邻两次土壤水分的差值加上时段内降水和灌水量为该时段内作物蒸发蒸腾量。

收获计产:棉花试验区每年9月中上旬开始收

花;9月中下旬第2次收花,10月上中旬收霜后花; 并做好称重(0.01 mg)记录。
10月中下旬拔杆。测定产量时,各小区分别收获,

表 3 棉花膜下滴灌灌溉制度试验设计方案

Table 3 The design scheme of irrigation schedule experiment for cotton by drip irrigation under film

编号 Code	处理 Treatment	灌溉制度 Irrigations schedule							毛管配置 Lateral tube layout	
		灌水定额 Irrigation quota/($\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$)								
灌水次数 Irrigation frequency		1	2	3	4	5	6	7	灌溉定额 Irrigation norm /($\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$)	
灌水时间 Irrigation time		开花初期 Early flowering	开花期 Flowering	棉铃期 Boll			吐絮初期 Initial boll opening	吐絮期 Boll opening		
G1—1	G ₁ W ₂ R ₁	20	15	15	15	15	10	10	W ₂ = 100	一管三行
G1—2	G ₁ W ₃ R ₁	20	10	10	10	10	10	10	W ₃ = 80	One tube with three lines (R ₁)
G1—3	G ₁ W ₄ R ₁	20		10	10	10	10	10	W ₄ = 60	
G1—4	G ₁ W ₅ R ₁	20		10	10	10			W ₅ = 40	
G1—5	G ₁ W ₂ R ₂	20	15	15	15	15	10	10	W ₂ = 100	一管四行
G1—6	G ₁ W ₃ R ₂	20	10	10	10	10	10	10	W ₃ = 80	One tube with four lines (R ₂)
G1—7	G ₁ W ₄ R ₂	20		10	10	10	10	10	W ₄ = 60	
G1—8	G ₁ W ₅ R ₂	20		10	10				W ₅ = 40	
灌水时间 Irrigation time		现蕾期 Squaring stage	开花期 Flowering stage	棉铃期 Boll stage			吐絮初期 Initial boll opening stage			
G2—1	G ₂ W ₁ R ₁	20	20	20	20	20	20		W ₁ = 120	一管三行
G2—2	G ₂ W ₂ R ₁	20	20	20	20	20	20		W ₂ = 100	One tube with three lines (R ₁)
G2—3	G ₂ W ₃ R ₁	20	20	20	20	20	20		W ₃ = 80	
G2—4	G ₂ W ₄ R ₁	20		20	20	20	20		W ₄ = 60	
G2—5	G ₂ W ₁ R ₂	20	20	20	20	20	20		W ₁ = 120	一管四行
G2—6	G ₂ W ₂ R ₂	20	20	20	20	20	20		W ₂ = 100	One tube with four lines (R ₂)
G2—7	G ₂ W ₃ R ₂	20	20	20	20	20	20		W ₃ = 80	
G2—8	G ₂ W ₄ R ₂	20		20	20	20	20		W ₄ = 60	

1.4 数据统计与方法

采用 Excel 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 膜下滴灌灌溉制度对棉花耗水、蒸腾速率的影响

棉花的生育阶段划分为播种~现蕾、现蕾~开花、开花~吐絮、吐絮~拔杆阶段;按阶段分别计算了棉花生育期或阶段耗水量、日蒸腾速率。生育阶段耗水量等于阶段内的土壤含水量增值、降水、灌水量之和,日蒸腾速率等于阶段耗水量除以生育阶段天数。膜下滴灌灌溉制度对棉花耗水、蒸腾速率的影响如表 4 和表 5 所示。结果表明,灌溉定额一定时毛管配置方式对棉花耗水量影响差异不大,G₁ 方案在 247~276 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 之间变化;G₂ 方案耗水量与 G₁ 方案耗水量变化基本相同,一管三行略高于一管四行,随灌溉定额的增加而增加,在 252~272 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 之间变化。花铃期是需水高峰期,阶段耗水量前期 61 天内低于 40 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,现蕾~开花 24 天内变化于 40~50 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,开花~吐絮 60 天内变化于 140~165 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,后期 21 天内在 15 $\text{m}^3 \cdot$

667 m^{-2} 以下。在不同灌溉定额下,日蒸腾水量变化趋势一致,且中期大而前后期小。从播种到现蕾,日蒸腾量低于 1.5 mm,并呈下降趋势,受降水影响,日蒸腾量先增大后减小,至开花期下降至 1 mm 以下;开花期后,日蒸腾量随作物的生长呈直线增长,到花铃期日蒸腾量 2.5~3 mm 达最高,吐絮后呈直线快速下降。

2.2 膜下滴灌灌水因素对棉花产量效益的影响

(1) 灌水定额对棉花产量的影响。

膜下滴灌棉花产量随灌水定额增加而增加,增产水平极显著 ($F = 59.66, P < 0.01$)。灌水定额 15 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的比 10 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的增产 12~16 $\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,增幅 4%~7%;灌水定额 20 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的比 15 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的增产 45~51 $\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,增幅 16%~19%;比 10 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的增产 61~63 $\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,增幅 23%~25% (表 6)。所以灌水定额 20 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 是一管三行或一管四行膜下滴灌棉花的高产灌水定额。图 2 也进一步证明在相同灌溉定额时灌水定额 20 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的 G₂ 类灌溉制度产量效

益明显高于灌水定额 10、15、20 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的 G_1 类灌溉制度产量效益,增产 50 ~ 80 $\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$, 差异显著。灌水定额为 20 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的 G_2 类灌溉制度比灌水定额 10、15、20 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的 G_1 类灌溉制度的产量增加极显著 ($F = 9.77, P < 0.01$), 增幅达 17% ~ 58%。

(2) 灌溉定额与产量效益关系。

棉花膜下滴灌灌溉定额与产量呈二次抛物线关系, $R^2 > 0.96$ 相关程度高(图 2), 灌溉定额 115 ~ 120 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 以下时, 产量随灌溉定额的增加显著 ($F = 10.4, P < 0.05$)。 G_1 灌溉制度条件下(图 2 中虚线), 当灌溉定额达到 93 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 时, 棉花产量达到 272 $\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$, 相应的灌溉水分生产率达到 2.92 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 G_2 灌溉制度条件下(图 2 中实线), 当灌溉定额达到 115 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 时, 棉花产量达到 323 $\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$, 相应的灌溉水分生产率达到 2.81 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。结果表明:灌溉定额在 80 ~ 90 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 以下, 产量随定额呈直线增长, 说明此阶段灌水对棉花产量起

决定性作用;灌溉定额为 90 ~ 115 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 时, 产量随灌溉定额增长明显减缓, 说明此阶段水量增幅大于产量增幅, 水决定性作用逐渐减缓;灌溉定额大于 115 ~ 120 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 时产量随灌溉定额的增加而减少, 说明此阶段灌水不利于棉花产量的增加。说明全生育期灌水 80 ~ 120 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 是膜下滴灌棉花获得高产的较为合理的灌溉定额。

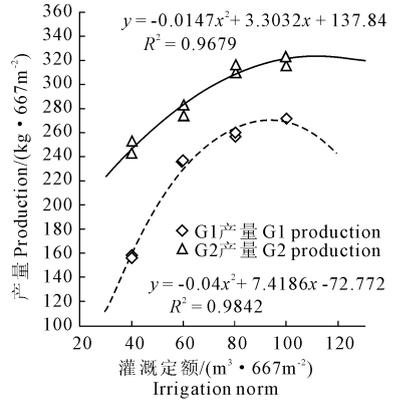


图 2 灌溉制度与产量的比较

Fig. 2 The comparison between irrigation schedule and production

表 4 G_1 类灌溉制度条件下棉花耗水量和蒸腾速率

Table 4 The cotton water consumption and transpiration rate under G_1 irrigation schedule

灌溉定额 Irrigation amount / $(\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2})$	生育期 Growth stage		播种 ~ 现蕾 Sowing ~ budding	现蕾 ~ 开花 Budding ~ flowering	开花 ~ 吐絮 Flowering ~ boll opening	吐絮 ~ 拔杆 Boll opening ~ pull rod	合计 Total
	起止时间 Start stop time(M - d)		04 - 26 - 06 - 26	06 - 27 - 07 - 25	07 - 26 - 09 - 25	09 - 26 - 10 - 18	04 - 26 - 10 - 18
	累计 Cumulative days/d		61	89	150	172	172
历时 Duration/d		61	28	61	22	172	
100	耗水量/ $(\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2})$	R_1	33.29	57.30	145.54	12.13	248.26
	Water consumption	R_2	39.68	41.07	155.87	11.03	247.66
	日平均蒸腾速率/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	R_1	0.82	1.41	3.58	0.30	
	Daily average transpiration rate	R_2	0.98	1.01	3.83	0.27	
80	耗水量/ $(\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2})$	R_1	32.79	54.11	145.79	30.91	263.61
	Water consumption	R_2	34.29	46.63	150.64	31.46	263.03
	日平均蒸腾速率/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	R_1	0.81	1.33	3.59	0.76	
	Daily average transpiration rate	R_2	0.84	1.15	3.70	0.77	
60	耗水量/ $(\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2})$	R_1	27.09	49.98	165.75	25.31	268.13
	Water consumption	R_2	31.85	50.75	163.70	24.53	270.83
	日平均蒸腾速率/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	R_1	0.67	1.23	4.08	0.62	
	Daily average transpiration rate	R_2	0.78	1.25	4.03	0.60	
40	耗水量/ $(\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2})$	R_1	32.26	50.37	159.52	29.79	271.93
	Water consumption	R_2	35.38	56.79	150.83	30.50	273.50
	日平均蒸腾速率/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	R_1	0.79	1.24	3.92	0.73	
	Daily average transpiration rate	R_2	0.87	1.40	3.71	0.75	

表 5 G_2 类灌溉制度条件下棉花耗水量和蒸腾速率Table 5 The cotton water consumption and transpiration rate under G_2 irrigation schedule

灌溉定额 Irrigation amount $/(m^3 \cdot 667m^{-2})$	生育期 Growth stage	播种 ~ 现蕾 Sowing ~ budding	现蕾 ~ 开花 Budding ~ flowering	开花 ~ 吐絮 Flowering ~ boll opening	吐絮 ~ 拔杆 Boll opening ~ pull rod	合计 Total						
							起止时间 Start stop time(M - d)	04 - 21-06 - 22	06 - 23-07 - 16	07 - 17-09 - 14	09 - 15-10 - 20	04 - 21-10 - 20
							累计 Cumulative days/d	63	87	147	183	183
历时 Duration/d	63	24	60	36	183							
100	耗水量 $/(m^3 \cdot 667m^{-2})$	R_1	58.72	34.64	127.31	49.78	271.16					
	Water consumption	R_2	47.59	32.38	106.29	30.97	271.26					
	日平均蒸腾速率 $/(mm \cdot d^{-1})$	R_1	1.40	0.82	3.03	1.19						
	Daily average transpiration rate	R_2	1.13	0.77	2.53	0.74						
80	耗水量 $/(m^3 \cdot 667m^{-2})$	R_1	59.53	31.08	134.50	50.36	275.47					
	Water consumption	R_2	58.97	44.97	118.40	52.87	275.21					
	日平均蒸腾速率 $/(mm \cdot d^{-1})$	R_1	1.42	0.74	3.20	1.20						
	Daily average transpiration rate	R_2	1.40	1.07	2.82	1.26						
60	耗水量 $/(m^3 \cdot 667m^{-2})$	R_1	51.25	34.07	128.47	47.88	261.67					
	Water consumption	R_2	55.23	29.65	132.21	42.54	260.34					
	日平均蒸腾速率 $/(mm \cdot d^{-1})$	R_1	1.22	0.81	3.06	1.14						
	Daily average transpiration rate	R_2	1.31	0.71	3.15	1.01						
40	耗水量 $/(m^3 \cdot 667m^{-2})$	R_1	42.61	42.66	128.32	39.35	253.69					
	Water consumption	R_2	42.30	41.88	130.81	36.47	252.21					
	日平均蒸腾速率 $/(mm \cdot d^{-1})$	R_1	1.01	1.02	3.06	0.94						
	Daily average transpiration rate	R_2	1.01	1.00	3.11	0.87						

表 6 灌水定额与产量效益关系分析

Table 6 Analysis of benefit relationship between irrigation quota and production

编号 Code	毛管配置 Lateral tube layout	灌水定额 Irrigation quota $/(m^3 \cdot 667m^{-2})$	灌溉定额 Irrigation amount $/(m^3 \cdot 667m^{-2})$	产量 Yield $/(kg \cdot 667m^{-2})$	增产 Increase yield $/(kg \cdot 667m^{-2})$	增幅 Increase /%	备注 Remarks
G_2-1		20	100	316.78	45.48	16.76	20 比 15
G_1-1	R_1	15	100	271.30	61.18	23.94	20 比 10
G_1-2		10	80	255.60	15.70	6.14	15 比 10
G_2-5		20	100	321.74	50.64	18.68	20 比 15
G_1-5	R_2	15	100	271.10	62.84	24.27	20 比 10
G_1-6		10	80	258.90	12.20	4.71	15 比 10

(3) 花铃期灌水量对产量的影响。

图 3 表明棉花产量随花铃期灌水量的增加而增加;产量与灌水量呈二次多项式关系,相关程度高 ($R^2 > 0.96$),灌溉定额 $60 \sim 80 m^3 \cdot 667m^{-2}$ 以下时,产量随灌量的增加显著 ($F = 10.51, P < 0.05$)。花铃期灌水量 $60 m^3 \cdot 667m^{-2}$ 以下产量随水量呈直线增加;而灌水 $60 \sim 80 m^3 \cdot 667m^{-2}$ 增幅变缓;灌水 $90 m^3 \cdot 667m^{-2}$ 时达最高产量水平,产量可达 $320 kg \cdot 667m^{-2}$ 以上。说明膜下滴灌棉花花铃期是棉花的关键灌水期,花铃期灌水 3 ~ 4 次,灌水 $20 m^3 \cdot 667m^{-2}$,灌水量 $60 \sim 80 m^3 \cdot 667m^{-2}$ 是膜下滴灌棉花获得高产的较为合理的灌水制度。

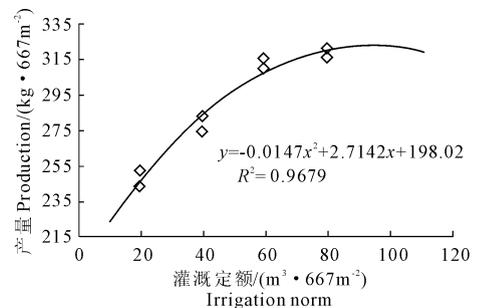


图 3 花铃期灌水量与产量关系

Fig. 3 The relations between irrigation water volume and production in the boll stage

(4) 灌水时间对产量的影响。

第一次灌水的时间(在现蕾期比开花初期增产)对产量的影响达到极显著水平($F = 32.4, P < 0.01$),而两种灌溉方式的增产增幅差异不明显($F = 0.03, P > 0.05$)。吐絮初期9月4日降水27 mm,最后一次灌水未实施,降水相当灌水 $18 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,在 $40 \sim 60 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 灌溉定额情况下,在现蕾期开始第一次灌水比在开花初期开始的增产 $42 \sim 91 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,增幅 $18\% \sim 58\%$;现蕾期灌第一次水的平均产量 $263.7 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,比开花初期灌第一次水的增产 $66.57 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,增幅 33.88% ;灌溉定额 $60 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的平均产量 $256.78 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,比灌溉定额 $40 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的增产 $54 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,增幅 26.63% 。结果表明,棉花膜下滴灌产量的提高是第一次灌水时间和灌溉定额偶合作用的结果,现蕾期开始第一次灌水的产量大于开花初期开始第一次灌水(表6)。故,第一次灌水的时间在现蕾期比较合理。

吐絮初期灌最后一次水比吐絮中后期灌最后一

次水产量增加显著($F = 9.6, P < 0.05$)。灌溉定额在 $80 \sim 100 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 范围内,最后一次灌水时间在吐絮初期时,产量为 $273 \sim 316 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,在吐絮中后期时产量只有 $255 \sim 272 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$ 。灌溉定额 $100 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 两种灌溉方式下吐絮初期灌最后一次水的平均产量 $312.82 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,比吐絮中后期灌最后一次水的增产 $41.62 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,增幅 15.35% ;灌溉定额 $80 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 平均产量 $278.07 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,增产 $20.82 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,增幅 8.09% 。两种灌溉方式不同灌溉定额时吐絮初期灌最后一次水的平均产量 $295.45 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,增产 $31.22 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$ 增幅 11.82% (表7)。这是第一次和最后一次灌水时间与灌水定额的综合影响的结果。九月下旬棉花已进入吐絮中期,此时灌水近乎无效,甚至起了反作用,表现在摘花期又有新芽从腋间不断发出,形成水分无效消耗,棉花不能按期成熟,品质产量均有下降。因此最后一次灌水应在9月上旬结束比较合适,若8月25日至9月6日有大于20 mm的有效降水可减少一次灌水。

表7 第一次和最后一次灌水时间对产量的影响

Table 7 The effect on yield by the first and last irrigation time

灌水次数 Irrigation frequency	灌水时间 Irrigation time	灌溉定额 Irrigation amount /($\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$)	籽棉产量/($\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$)		产量 Yield /($\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$)	增产 Increase /($\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$)
			一管三行 R_1	一管四行 R_2		
第一次 The first	开花初期 Early flowering	60	234.80	236.20	235.50	42.57
		40	156.20	158.80	157.50	18.07
	现蕾期 Budding stage	60	273.67	282.46	278.07	57.50
		40	243.67	252.46	248.07	66.57
最后一次 The last	吐絮期 Boll opening	100	271.10	271.30	271.20	41.62
		80	258.90	255.60	257.25	15.35
	吐絮初期 Initial bolloopening	100	315.51	310.13	312.82	8.09
		80	282.46	273.67	278.07	31.22

2.3 节水高产机理

膜下滴灌棉花灌溉定额与产量呈二次抛物线关系, $R^2 > 0.9$ 相关程度高,最佳灌溉定额棉花 $115 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,产量 $323 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,灌溉水生产率 $2.81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。膜下滴灌棉花产量随灌水定额增加而增加,灌水定额 $20 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的比 $15 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的增产 $16\% \sim 19\%$;比 $10 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的增产 $23\% \sim 25\%$,灌水定额 $20 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的 G_2 类灌溉制度平均产量 $289.55 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,比 $10、15、20 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的 G_1 类灌溉制度平均产量增加 25.69% ,说明灌水定额 $20 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 是膜下滴灌棉花取得高产的有效定额。灌水定额 $20 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 时,产量随灌水次数的增加而增加,灌水 $3 \sim 5$ 次的较灌水 2 次的增产显

著,增幅 $12.09\% \sim 28.97\%$;灌水 $4 \sim 5$ 次较灌水 4 次增产明显减缓,增幅 $12.5\% \sim 14.81\%$;灌水 5 次较灌水 4 次的增产不显著,增幅只有 2% 左右,说明 $4 \sim 5$ 次灌水制度是干旱缺水区较佳的高产灌溉制度。灌溉定额 $80 \sim 100 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的平均产量 $312.82 \sim 319.26 \text{ kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,均达高产水平(表8); G_2 类灌溉制度条件下,灌溉定额 $80 \sim 100 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 比 $40 \sim 60 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的灌溉,株高 70 cm 增加 $5 \sim 10 \text{ cm}$,果枝数 $7 \sim 8$ 个、棉铃数 $6 \sim 7$ 个分别增加 $1 \sim 2$ 个,是为无霜短的石河流域中下游种植矮杆密植(1.2万株左右)棉花奠定了高产条件;棉铃脱落或空枝率小于 22% 下降 $6 \sim 13$ 个百分点,棉铃重 $9.5 \sim 10 \text{ g} \cdot \text{个}^{-1}$,增加 $1 \sim 2 \text{ g} \cdot \text{个}^{-1}$,产量 $310 \sim 322 \text{ kg} \cdot$

667m⁻²增加 40~60 kg·667m⁻²,增幅 13%~19%;G₂ 类灌溉制度膜下滴灌试验安排比较合理,将有限的水量灌在关键时期,促进了营养生长和生殖生长。

两种毛管配置方式下灌溉定额与产量均呈二次抛物线关系,相关程度高($R^2 > 0.96$),产量水平无差异($F = 0.04, P > 0.1$),一管三行优于一管四行的灌溉方式,增产 1.57%~3.61%;一管三行和一管四行生育期灌水 80~100 m³·667m⁻²,都能达到 310~325 kg·667m⁻²的高产水平;G₂ 类灌溉制度条件下,灌水

4~5 次灌溉定额 80~100 m³·667m⁻²的增产 4.9~5.5 kg·667m⁻²,增幅小于 2%;灌水 2~3 次灌溉定额 40~60 m³·667m⁻²的增产 8~9 kg·667m⁻²,增幅 3%~4%(表 8)。所以膜下滴灌棉花选择一条毛管控制灌溉 4 行作物比一条毛管控制灌溉 3 行作物即可减少投入又能获得高产,一管三行、一管四行两种高效灌溉方式,毛管间距可扩大到 80~100 cm,毛管用量比现状减少 33%~50%,是干旱缺水地区膜下滴灌棉花节水高效的田间灌溉方式。

表 8 不同灌溉制度条件下膜下滴灌棉花产量

Table 8 The cotton yield under different irrigation schedule by drip irrigation under film

G ₁					G ₂				
灌溉定额 Irrigation amount /(m ³ ·667m ⁻²)	灌水次数 Irrigation frequency	产量 Yield/(kg·667m ⁻²)			灌溉定额 Irrigation amount /(m ³ ·667m ⁻²)	灌水次数 Irrigation frequency	产量 Yield/(kg·667m ⁻²)		
		一管三行 R ₁	一管四行 R ₂	平均 Average			一管三行 R ₁	一管四行 R ₂	平均 Average
40	3	158.8	156.2	157.5	40	2	252.46	243.67	248.065
60	4	236.2	234.8	235.5	60	3	282.46	273.67	278.065
80	5	258.9	255.6	257.3	80	4	315.51	310.13	312.820
100	16	271.1	271.3	271.2	100	5	321.74	316.78	319.260

干旱区降水稀少而在作物生育期仍有大于 10~25 mm 的有效降水,对土壤水分及作物生长和产量产生较大影响,尤其对棉花作物影响更大。当某生育期降水大于 10~15 mm 时延迟灌水 3~5 d,大于 20~25 mm 时延迟一轮灌水。膜下滴灌棉花前期降水和播种前灌水的共同作用使作物根层土壤水分(体积含水量,下同)保持在 50%~60% 以上,促进了作物根系发育,有利于较深层的土壤水分的利用,促进了作物营养生长,搭建了高产丰产骨架。关键需水期有效降水和适宜的灌水定额共同作用,使作物根层土壤水分保持在 45%~50% 以上,控制了营养生长,促进了生殖生长,提高了结果率、结实率、籽粒饱满度和品质。成熟前期有效降水大于 20 mm,土壤水分保持在 45%~40% 以下,可防止作物贪青徒长晚熟和品质产量下降。

膜下滴灌棉花现蕾期灌第一次水,吐絮初期灌最后一次水,棉铃期灌水 2~4 次,全生育期灌水 4~6 次,灌水定额 20 m³·667m⁻²,灌溉定额 80~120 m³·667m⁻²的灌溉制度,是有限灌溉条件下的节水高效的灌溉模式,产量可达 310 kg·667m⁻² 以上水平,灌溉水生产率可达 2.8~3.0 kg·667m⁻³。土壤水分下限开花前不低于 60%,棉铃期维持在 45%~60% 之间,吐絮期至收获期可低于 40%~50% 以下,膜下滴灌土壤水分可满足作物营养生长和生殖生长的需求,利用有限的降水资源,达到节水高效的目的。在雨量较好的条件下膜下滴灌棉花选用一管三

行或一管四行的灌溉方式,灌溉定额 80~100 m³·667m⁻²,灌水 4~5 次,灌水定额 20 m³·667m⁻²的灌溉制度是获得高产的最优灌溉模式。

不同水平年不同生育期降水量所对应的节水高产高效灌溉制度见表 9。吐絮始期(8 月 25 日—9 月 5 日)有效降水累计 25 mm 或次降水大于 20 mm 时可采用 5 次水灌溉制度,现蕾期灌 1 次水,花铃期灌 4 次水,吐絮后不再灌水;棉铃期(7 月 15 日—8 月 26 日)无一次大于 10 mm 的有效降水花铃期灌水 4 次,现蕾、吐絮始各灌 1 次水共灌 6 次水;两生育期内同时有效降水累计或次降水大于 15~20 mm 时,采用 4 次水制度。为确保高产各年份在棉铃期可增灌 1 次水,定额 10 m³·667m⁻²。

3 讨论与结论

1) 灌溉定额一定时毛管配置方式对棉花耗水量影响差异不大,G₁ 方案变化于 247~276 m³·667m⁻²;G₂ 方案耗水量近于 G₁ 方案耗水量,一管三行略高于一四管行,随灌溉定额的增加而增加,变化于 252~272 m³·667m⁻²。耗水模数与灌溉定额从 100 m³·667m⁻² 逐渐下降至 40 m³·667m⁻²,呈逆向关系。在不同灌溉定额下,日蒸腾水量呈同一趋势变化,并中期大前后期小。膜下滴灌棉花产量随灌水定额增加而增加。灌水定额 20 m³·667m⁻² 是一管三行或一管四行膜下滴灌棉花的高产灌水定额。灌溉定额达到 115 m³·667m⁻² 时,棉花产量达到 323

表9 节水高产高效灌溉制度
Table 9 High efficient irrigation program

分类 kind	水平年 Level year	降水 Precipitation		灌水 次数 Irrigation frequency	灌溉定额 Irrigation amount /($\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$)	灌水定额 Irrigation quota/($\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$)					
		花铃期 Flowering and boll	吐絮初 Initial boll opening			现蕾期 Squaring stage	花铃期 Flowering andboll (次数 * 定额 + 定额) Frequency * quota + quota	吐絮初 Initial boll opening			
高效灌 溉制度 Efficient irrigation system	干旱年 Dry year	有	有	4	80	20	20	20	20	0	
	平水年 Normal flow year	无	有	5	100	20	20	20	20	0	
	平水年 Normal flow year	有	无	5	100	20	20	20	20	20	
	丰水年 High flow year	无	无	6	120	20	20	20	20	20	
高产灌 溉制度 High yield irrigation system	干旱年 Dry year	有	有	5	90	20	20	20	10	10	0
	平水年 Normal flow year	无	有	6	110	20	20	20	20	10	0
	平水年 Normal flow year	有	无	6	110	20	20	20	10	20	
	丰水年 High flow year	无	无	7	130	20	20	20	20	10	20

$\text{kg} \cdot 667\text{m}^{-2}$,相应的灌溉水分生产率达到 $2.81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。灌溉定额在 $80 \sim 90 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 以下时,产量随定额呈直线增长,说明此阶段灌水对棉花产量起决定性作用;灌溉定额为 $90 \sim 115 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 时,产量随灌溉定额增长明显减缓,说明此阶段水量增幅大于产量增幅,水决定性作用逐渐减缓;灌溉定额大于 $115 \sim 120 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 时产量随灌溉定额的增加而减少,说明此阶段水起了不利因素的作用。

2) 花铃期是需水高峰期,此阶段缺水将严重影响作物产量,适时适量灌水,土壤水分保持在 $45\% \sim 50\%$ 以上时可取达高产水平^[21-22],这与前面分析的结果是一致的。膜下滴灌棉花花铃期是棉花的关键灌水期,花铃期灌水 $3 \sim 4$ 次,灌水 $20 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,灌水量 $60 \sim 80 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 是膜下滴灌棉花获得高产的较为合理的灌水制度。第一次灌水时间在现蕾始比较合理;最后一次灌水应在9月上旬结束比较合适。膜下滴灌棉花选择一条毛管控制灌溉4行作物比一条毛管控制灌溉3行作物即可减少投入又能获得高产水平,是石河流域矮秆密植棉花节水高效的田间工程灌溉方式。

3) 以灌溉水生产率最高为目标的高效灌溉制度:现蕾始灌第一次水(6月20日左右),吐絮始灌最后一次水(9月1日—9月5日),棉铃期灌水4次(7月10日左右开始灌水,灌水间隔 $15 - 10 - 15 \text{ d}$,灌水定额 $20 - 20 - 20 - 20 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,8月20日左右结束),全生育期灌水6次,灌溉定额 $120 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的灌溉制度。以获最高产量为目标的高产灌溉制度:现蕾初期灌第一次水(6月20日左右),吐絮初期灌最后一次水(9月1日—9月5日),棉铃期灌水5次(7月10日左右开始灌水,灌水间隔 $15 - 7 - 7 - 11 \text{ d}$,灌水定额 $20 - 20 - 10 - 20 - 20 \text{ m}^3 \cdot$

667m^{-2} ,8月20日左右结束),全生育期灌水7次,灌溉定额 $130 \text{ m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$ 的灌溉制度。

参考文献:

- [1] 石培泽,粟晓玲.武威市石羊河流域种植结构调整与节水思路[J].节水灌溉,2009,(5):55-57.
- [2] 张金霞,贾生海,成自勇.西北旱区碎麦秸垫膜上灌对玉米出苗及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(6):117-120.
- [3] 康绍忠,粟晓玲,杨秀英,等.石羊河流域水资源合理配置及节水生态农业理论与技术集成研究的总体框架[J].水资源与水工程学报,2005,16(1):1-9.
- [4] 张金霞.西北旱区碎麦秸垫膜上灌的高效用水机理及土壤环境效应研究[D].兰州:甘肃农业大学,2013.
- [5] 石培泽,杨秀英.旱区棉花优质高效节水栽培技术试验研究[J].灌溉排水,1996,15(4):28-32.
- [6] 张金霞.秸秆覆盖免耕储水灌溉对春小麦耗水特征及灌溉水分利用效率的影响[J].中国沙漠,2012,32(5):1501-1506.
- [7] 石岩,成自勇,王开录.滴灌工程技术在河西地区大田推广应用中的问题探讨——以勤锋农场滴灌工程为例[J].中国水利,2013,(11):27-29.
- [8] 张金霞,刘成元,施炯林,等.河西灌区免耕秸秆覆盖对春小麦播种及出苗的影响[J].甘肃农业大学学报,2006,41(4):31-34.
- [9] 景明,张金霞,施炯林.覆盖免耕储水灌溉对豌豆的腾发量和土壤水分效应的影响[J].甘肃农业大学学报,2006,41(5):130-133.
- [10] 张金霞.黑河流域秸秆覆盖免耕储水灌节水效应研究[D].兰州:甘肃农业大学,2006.
- [11] 张金霞,施炯林,刘成元.绿洲灌区留茬覆盖免耕储水灌溉在休闲期的节水效应[J].甘肃农业大学学报,2007,42(1):114-118.
- [12] 张振华.微源入渗特性规律与膜下滴灌作物需水量研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2002.
- [13] 张朝勇.膜下滴灌条件下土壤水热的动态变化和作物需水规律的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2003.

参考文献:

- [1] 秦大庸,于福亮,裴源生.宁夏引黄灌区耗水量及水均衡模拟[J].资源科学,2003,25(6):19-24.
- [2] 刘勤.宁夏引黄灌区节水农业技术模式研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [3] 王战平.宁夏引黄灌区水资源优化配置研究[D].银川:宁夏大学,2014.
- [4] 张万宝,李聪敏,曹峰.黄河水滴灌工程泥沙处理效果评估[J].农业工程,2015,5(4):107-109.
- [5] 张杰武,冯吉,徐飞鹏,等.引黄滴灌砂石过滤器滤料过滤性能[J].排灌机械工程学报,2016,34(4):357-361.
- [6] 孙贯芳,于健,杜斌,等.过滤后黄河水对滴灌系统的影响[J].排灌机械工程学报,2015,33(10):901-907.
- [7] 杜慧慧.乌海市引黄滴灌水净化模式及净化系统水质变化规律研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.
- [8] Bounoua Salim, Tomas Séverine, Labille Jérôme, et al. Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches[J]. Irrigation Science, 2016,34(4):327-342.
- [9] Hills D J, Nawar F M, Waller P M. Effects of chemical clogging on drip-tape irrigation uniformity[J]. Transactions of the Asae, 1989,32(4):1202-1206.
- [10] 李康勇,牛文全,张若婵,等.施肥对浑水灌溉滴头堵塞的加速作用[J].农业工程学报,2015,31(17):81-90.
- [11] 刘璐,李康勇,牛文全,等.温度对施肥滴灌系统滴头堵塞的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):98-104.
- [12] 刘璐,牛文全,武志广,等.施肥滴灌加速滴头堵塞风险与诱发机制研究[J].农业机械学报,2017,48(1):228-236.
- [13] 杜立鹏,张新燕.低压下加肥对迷宫滴头流量及灌水均匀度的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):142-145.
- [14] Bozkurt Sefer. The Effects of fertigation management in the different type of in-line emitters on trickle irrigation system[J]. Journal of Applied Sciences, 2006,6(5):1165-1171.
- [15] 刘燕芳,吴普特,朱德兰,等.滴灌条件下水的硬度对滴头堵塞的影响[J].农业工程学报,2015,31(20):95-100.
- [16] 王伟楠,徐飞鹏,周博,等.引黄滴灌水源中泥沙表面附生物膜的分形特征[J].排灌机械工程学报,2014,32(10):914-920.
- [17] 周博,李云开,宋鹏,等.引黄滴灌系统灌水器堵塞的动态变化特征及诱发机制研究[J].灌溉排水学报,2014,33(4/5):123-128.
- [18] 吴泽广,张子卓,张珂萌,等.泥沙粒径与含沙量对迷宫流道滴头堵塞的影响[J].农业工程学报,2014,30(7):99-108.
- [19] 中华人民共和国水利部.GB/T 50485-2009 微灌工程技术规范[S].北京:中国计划出版社,2009.
- [20] 刘璐,牛文全, Bob Zhou. 细小泥沙粒径对迷宫流道灌水器堵塞的影响[J].农业工程学报,2012,(1):87-93.
- [21] 王心阳,王文娥,胡笑涛.滴灌施肥对滴头抗堵塞性能及系统均匀度影响试验研究[J].中国农村水利水电,2015,(11):1-5.
- [22] Mukerjee P, Ray A. The effect of urea on micelle formation and hydrophobic bonding[J]. Journal of Physical Chemistry, 1963,67(1):190-192.
- [23] 王镜和.含无机盐和尿素的直链烷基苯磺酸钠浓溶液的粘度性质[J].高等学校化学学报,1995,16(2):287-289.
- [24] 张建合.疏水凝胶及疏水相互作用研究进展[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2004,17(2):237-243.
- [25] Rupley J A. The effect of urea and amides upon water structure[J]. Journal of Physical Chemistry, 1964,68(7):269-284.
- [26] Grdolnik J, Marechal Y. Urea and urea-water solutions-an infrared study[J]. Journal of Molecular Structure, 2002,615(1-3):177-189.
- [27] Soper A K, Castner E W. Impact of urea on water structure: a clue to its properties as a denaturant[J]. Biophysical Chemistry, 2003,105(2-3):649.
- [28] Adama R, Balyuzi H H M, Burge R E. X-ray diffraction studies of aqueous solutions of urea[J]. Journal of Applied Crystallography, 1977,10(4):256-261.
- [29] Keuleers R, Desseyn H O, Rousseau B, Alsenoy C V. Vibrational analysis of urea[J]. Journal of Physical Chemistry A, 1999,103(24):281-284.
- [30] 王家生,陈立,刘林,等.阳离子浓度对泥沙沉速影响实验研究[J].水科学进展,2005,16(2):169-173.
- [31] 武海霞,刘建军,赵启明.尿素溶液浓度对一维垂直入渗特性影响的试验研究[J].中国农村水利水电,2011,(6):67-69.

(上接第 85 页)

- [14] 李明思,郑旭荣,贾宏伟,等.棉花膜下滴灌灌溉制度试验研究[J].中国农村水利水电,2001,(11):13-15.
- [15] 李明思,康绍忠,杨海梅.地膜覆盖对滴灌土壤湿润区及棉花耗水与生长的影响[J].农业工程学报,2007,23(6):49-54.
- [16] 申孝军.棉花滴灌节水机理与优质高效灌溉模式[D].北京:中国农业科学院,2011.
- [17] 崔永增.西部戈壁葡萄膜下节水灌溉模式研究[D].兰州:甘肃农业大学,2012.
- [18] 艾先涛,李雪源,孙国清,等.新疆棉花膜下滴灌技术研究与存在问题[J].新疆农业大学学报,2004,27(S1):69-71.
- [19] 蔡焕杰,邵光成,张振华.棉花膜下滴灌毛管布置方式的试验研究[J].农业工程学报,2002,18(1):45-49.
- [20] 韩权利,赵万华,丁玉成.滴灌用灌水器的现状及分析[J].节水灌溉,2003,(1):17-18.
- [21] 石培泽,杨秀英.春小麦适度亏缺灌溉的节水增产效应[J].干旱地区农业研究,1998,6(2):80-83.
- [22] 石培泽,马金珠.干旱区节水灌溉理论与实践[M].兰州:兰州大学出版社,2004.