

基于 Jensen 模型的压砂地西瓜灌溉制度优化研究

马 波^{1,2,3}, 田军仓^{1,2,3}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021;

3. 教育部旱区现代农业水资源高效利用工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: 针对压砂地西瓜水资源高效利用和合理灌溉制度问题, 于 2008 年和 2009 年采用试坑对比试验方法进行了研究, 利用水分生产函数 Jensen 模型分析了压砂地西瓜耗水规律及需水关键期, 并用 Jensen 模型对压砂地西瓜灌溉制度进行了优化, 结果表明: (1) 压砂地西瓜全生育期耗水量为 79.6~409.9 mm; (2) 西瓜需水关键生育阶段顺序为“苗期 > 开花坐果期 > 膨大初期 > 膨大中期 > 伸蔓期 > 膨大后期”; (3) 压砂地西瓜各生育阶段的水分敏感系数 $\lambda_1 = 0.6171$, $\lambda_2 = 0.2707$, $\lambda_3 = 0.0355$, $\lambda_4 = 0.1097$, $\lambda_5 = 0.1390$, $\lambda_6 = 0.1106$; (4) 通过灌溉制度优化发现: 供水量范围为 80~240 mm 时增产效果最明显, 供水量达到 320 mm 时, 压砂地西瓜可获得高产。最优灌溉制度为: 苗期灌水 20~30 mm, 伸蔓期灌水 50~55 mm, 开花坐果期灌水 40~45 mm, 膨大初期灌水 70 mm, 膨大中期灌水 60~70 mm, 膨大末期灌水 60~65 mm。

关键词: 西瓜; 压砂地; 灌溉制度; Jensen 模型

中图分类号: S316; S651 文献标志码: A

Research on the optimal irrigation schedule of watermelon in gravel mulch field based on Jensen model

MA Bo^{1,2,3}, TIAN Jun-cang^{1,2,3}

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. The Research Center of Engineering Technology on Water-saving Irrigation and Water Resource Regulation Ningxia,

Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. The Center of Engineering Research on Modern Agricultural Water Resources

Efficient Utilization in Arid Region, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: The paper aimed at the problem of rational irrigation schedules and high efficiency utilization of water resources for watermelon in gravel mulch field, adopted the test pits contrast method in 2008 and 2009, using the water production function as Jensen model, analyzed the water consumption rule, key water requirement period and optimized the irrigation schedules by using Jensen model for watermelon in gravel mulch field. The results showed that: (1) The water consumption in whole growth period of watermelon in gravel mulch field was 79.6 to 409.9 mm. (2) The order of key water demand period for watermelon was ‘seedling stage > flowering and fruit setting stage > expand initial stage > expand middle stage > stretch tendril stage > expand late stage’. (3) The water sensitive index for each growth stage were: $\lambda_1 = 0.6171$, $\lambda_2 = 0.2707$, $\lambda_3 = 0.0355$, $\lambda_4 = 0.1097$, $\lambda_5 = 0.1390$ and $\lambda_6 = 0.1106$. (4) Through the optimal irrigation schedule found: the yield increasing effect was the most obvious when the irrigation supply was 80 to 240 mm; The high yield can be obtained when the irrigation supply reached 320 mm. The optimal irrigation schedule were: 20 to 30 mm in seedling stage, 50 to 55 mm in vine-extending stage, 40 to 45 mm in flowering and fruit setting stage, 70 mm in expand initial stage, 60 to 70 mm in expand interim stage, 60 to 65 mm in expand late stage.

Keywords: watermelon; gravel mulch field; irrigation schedules; Jensen model

早在唐代和清代, 我国农民就采用“沙田”栽培技术种植蔬菜作物, 是利用卵石、砾石、粗砂和细砂

的混合体覆盖在土壤表面(将直径为 2~5 cm 的冲积粗砾石平铺于地面 12~16 cm 厚), 以减少土壤水

分蒸发来保墒,这就形成了压砂地,亦称砂田,是我国西北干旱、半干旱地区独特的、传统的抗旱耕作形式,是劳动人民长期与干旱斗争,为适应干旱少雨及盐碱不毛之地而创造的旱农耕作方法,属土壤覆盖保墒技术之一^[1]。我国砂田主要分布在宁夏、甘肃、青海和新疆的一些干旱、半干旱地区^[2]。在世界上其它降水稀少的地方如法国的 Montpellier,美国的 Texas、Montana 和 Colorado,瑞士的 Chamoson 以及南非等也有砂田^[3]。

许多研究表明,砂田具有减少蒸发和径流、提高土壤温度和水分入渗、阻止水土流失和土壤次生盐渍化的作用。砂田能有效地协调水、肥、气、热的矛盾,有利于作物的高产、稳产和早熟^[4]。

作物水分生产函数(Crop water production function, CWPf)是反映作物产量随耗水量变化的规律、产量与水分投入量之间关系的数学模型,是合理调控灌溉使之有益于作物生长的主要依据,其自变量为水的投入量,或能反映水分状况的物理量。作物水分生产函数分为静态模型和动态模型两大类。静态模型是描述作物产量与水分的宏观关系,称为作物水分生产函数的最终产量模型;动态模型描述作物生长过程中作物干物质的积累过程对不同的水分水平的响应,并根据这种响应来预测不同时期作物干物质积累及最终产量^[5]。建立作物水分生产函数,一方面是预估各种灌溉水平下作物的产量,另一方面是为了研究作物在缺水条件下的优化灌溉制度并为经济用水提供依据。作物灌溉制度的优化,是以作物水分生产函数为依据,用各种优化方法求解灌水量在作物各生育期的最优化分配,以达到增加产量、提高灌溉水利用效率的目的。

近 10 年以来国内外学者对于作物水分生产函数进行了较多的研究,国内研究的主要问题是利用水分生产函数对冬小麦、洋葱等作物灌溉制度的优化^[6-8]以及对灌溉制度优化方法的研究^[9-11],还有学者对水分生产函数模型的适应性进行了相应的研究^[12-14],通过研究筛选出适合某一条件的水分生产函数的形式。

国外学者对水分生产函数的研究主要是从机理上研究水分对作物的影响,同时还考虑养分条件的影响,如 Ferreira 等^[15-16]研究了受气候因素影响条件下基于水分生产函数的作物产量、水分利用以及水量分配问题,还有学者利用水分生产函数进行灌溉制度和作物亏缺灌溉条件下估算水量平衡和产量响应的研究^[17]。在对模型适用性及算法研究方面, Igbadun 等对已有模型进行比较评价^[18]以及对模型算法的分析研究^[19-20]。

可见,利用水分生产函数进行作物各阶段水分敏感系数计算和灌溉制度优化是国内外学者广泛利用的有效方法,本研究根据覆膜条件下压砂地西瓜调亏灌溉田间试验资料,建立水分生产函数 Jensen 模型,并以节水、高产和高效为目标,进行灌溉制度优化,以期为宁夏中部干旱带压砂地西瓜高产及水资源高效利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验点基本情况

本试验点位于宁夏中卫市香山乡红圈子,北纬 36°56',东经 105°15',海拔 1 697.8 m。试验田土壤属砂壤土,土壤干容重为 $1.37 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,田间持水率为 24%(质量含水率)。土壤全盐量为 $0.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮为 $0.439 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷为 $0.64 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效氮为 $29.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $11.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾为 $70.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质为 $16.93 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 值为 8.63。

1.2 试验设计

在相同肥力、相同初始含水率、相同品种条件下按照行距 2 m,株距 1.5 m 布置,试验设计为 16 个处理,3 次重复,采用雨棚避雨,于 2008 年和 2009 年进行了试坑试验,试坑处理方法为:在原有压砂地上按 $2 \text{ m}\times 1.5 \text{ m}$ 划 48 个区,将每个区中间 $0.6 \text{ m}\times 0.6 \text{ m}$ 范围内砂砾移除,挖出 $0.6 \text{ m}\times 0.6 \text{ m}\times 0.6 \text{ m}$ 大的坑,将 48 个同样大小的坑所挖出的土均匀拌合,然后按照原容重装到 48 个试坑当中,再覆上原状砂砾形成新的压砂地,这样可以保证每个试坑土壤养分和初始含水率一样。

由于压砂地西瓜苗期持续时间较长,从播种发芽的种子到圆棵开始都处于保护状态下(防止冻害或者风沙危害),即用地膜覆盖或用塑料碗保护,保护期不考虑灌水,所以为了保证正常出苗,播前所有处理灌水 $30 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ (即 $9 \text{ L}\cdot\text{株}^{-1}$)。

所不同的是每个处理在整个生育阶段的每次补水时间和补水总量不同,具体方案如表 1 所示。表中的 1 表示补一次水,设计的补水定额为 $90 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.3 观测项目及方法

(1) 作物生育阶段:观测西瓜生长发育性状,记录各个处理的播种、出苗、圆棵、伸蔓、开花坐果、膨大和成熟的开始和结束日期及其有关的事件,观测依据为各生育期的参考标志^[21]。

(2) 土壤含水率的测定:2008 年采用烘干法,2009 年采用 TDR(时域反射仪)观测。

表1 试验灌水方案
Table 1 Experimental irrigation scheme

处理号 Treatment No.	生育阶段 The growth period					
	出苗期 Sprout	伸蔓期 Stretch tendrill stage	开花坐果期 Blossom and fruit stage	膨大初期 Expand initial stage	膨大中期 Expand interim stage	膨大后期 Expand late stage
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	
3	1	1	1	1		
4	1	1	1			
5	1	1				
6	1					
7		1	1	1	1	1
8	1		1	1	1	1
9	1	1		1	1	1
10	1	1	1		1	1
11	1	1	1	1		1
12	1		1	1		1
13		1		1	1	1
14		1	1	1	1	
15	1		1	1	1	
16	1		1		1	

注:表中的“1”表示实现1次灌水定额的灌水,实际是将 $90\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 的水分多次灌入试桶。

Note: '1' indicated the one time irrigation, actually put the irrigation quota of $90\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ into the test barrel for many times.

(3) 气象资料:采用该站内自动气象站观测资料,包括逐日气温、湿度、日照、降水、风速等资料。

(4) 西瓜产量测定:当西瓜成熟以后,测量每一个西瓜的质量,然后将每一个处理3个重复的质量进行平均,然后按照 $3\ 330\text{ 个}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计算成产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

2 结果分析

2.1 不同生育期灌水对西瓜耗水量的影响

利用水量平衡原理计算不同灌溉处理西瓜的生育期阶段耗水量和总耗水量,方程如下:

$$W_t - W_0 = W_r + P_0 + K + M - ET \quad (1)$$

式中, W_0 , W_t 为时段初和任一时段 t 时的土壤计划湿润层内的储水量(mm); W_r 为由于计划湿润层增加而增加的水量(mm),如计划湿润层在时段内无变化则无此项; P_0 为保存在土壤计划湿润层内的有效降雨量(mm); K 为时段 t 内的地下水补给量(mm),即 $K = kt$, k 为 t 时段内的平均每昼夜地下水补给量; M 为时段 t 内的灌溉水量(mm); ET 为时段 t 内的作物腾发量(mm)。

代入降雨量、补水量等资料,即可得到压砂地西瓜实际耗水量,计算结果见表2。从表2可以看出,各生育阶段耗水量随着灌水量而变化,灌水量多时

相应的耗水量也多,灌水量少时相应的耗水量也小,压砂地西瓜自从进入伸蔓期以后作物耗水量明显增大,至西瓜膨大期,西瓜耗水量达到最大,当西瓜开始成熟以后,作物耗水量有所减少。总耗水量最小的为处理6,也即灌1水处理,总耗水量仅为 79.64 mm ,耗水量最大的为处理1,也即灌水次数为6次,每个生育期都进行灌水,耗水量为 409.90 mm ,其余处理耗水量表现为一定的梯度规律。通过数据分析发现,梯度为 80 mm ,也即从总耗水量最小的 79.64 mm 到最大的 409.90 mm 之间形成一定的耗水规律,处理1到处理6耗水量依次为 $400, 320, 240, 160\text{ mm}$ 和 80 mm ,以此作为设计灌溉定额的依据。

2.2 不同灌水处理对西瓜产量的影响

西瓜成熟以后,测量每一个西瓜的质量,然后将每一个处理3个重复的质量进行平均,然后按照 $3\ 330\text{ 个}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计算成产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),将观测结果绘制成柱状图,如图1所示。

从图1看出,在处理2、7、8、9、10、11中全生育期缺一水情况下,苗期缺水减产 61% ,伸蔓期减产 37% ,开花坐果期减产 50% ,膨大初期 54% ,膨大中期减产 39% ,膨大后期 18% 。

在处理3、12、13、14、15全生育期缺两水的情况下,处理3膨大中期和后期各缺一水产量减少 43% ;处理12伸蔓期和膨大中期各缺一水产量减少

表 2 不同灌水处理西瓜阶段耗水量/mm

Table 2 The water consumption of watermelon in each stage with different treatment

处理号 Treatment No.	出苗期 Sprout	伸蔓期 Stretch tendrils stage	开花坐果期 Blossom and fruit stage	膨大初期 Expand initial stage	膨大中期 Expand interim stage	膨大后期 Expand late stage	总耗水量 Total water consumption
1	66.00	70.07	46.71	72.23	89.19	65.71	409.90
2	73.05	52.88	35.25	74.01	57.05	28.00	320.24
3	49.61	73.83	49.22	73.07	28.74	5.52	268.95
4	77.23	53.29	35.53	28.45	1.89	7.39	185.21
5	67.55	59.63	39.75	3.92	5.42	6.12	159.31
6	46.33	16.24	10.82	8.60	2.03	4.38	79.64
7	21.65	40.22	26.81	67.93	80.80	64.28	301.68
8	38.34	20.23	13.49	66.64	78.46	61.85	279.01
9	60.15	65.22	43.48	52.24	78.54	55.75	355.39
10	59.03	58.22	38.82	27.99	51.50	61.37	296.92
11	57.13	60.04	40.02	71.91	59.77	35.67	324.53
12	40.85	20.75	13.84	68.78	55.75	32.80	232.76
13	21.28	39.39	26.26	5.20	57.15	67.13	216.40
14	24.94	47.53	31.69	71.82	54.08	28.81	258.88
15	40.02	21.69	14.46	68.53	53.78	30.14	228.62
16	46.34	15.17	10.11	66.79	47.71	25.12	211.24

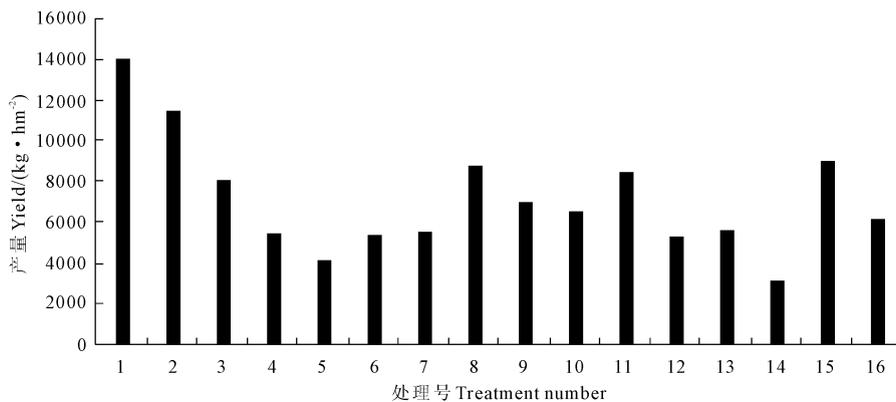


图 1 不同灌溉处理对西瓜产量的影响

Fig. 1 The effects of different irrigation treatment to watermelon yield

62%,说明伸蔓期和膨大中期需水量也比较高;处理13苗期和开花坐果期各缺一水产量减少60%;处理14苗期和膨大后期各缺一水产量减少77%,由于膨大后期缺一水情况下产量减少不明显,因此说明苗期一水尤为重要。处理15伸蔓期和膨大后期各缺一水产量减少36%,说明伸蔓水也为重要;在处理4、16中全生育期缺三水的情况下,在苗期、开花坐果期灌水,膨大初期和膨大后期不灌水,处理4产量与处理16产量比较接近,说明伸蔓水和膨大中期灌水同样重要。

从处理2和处理7、8、9、10、11看,在灌水量和灌水次数相同的情况下,处理2的产量明显高于处理7、8、9、10、11,而处理7产量最低,所以说苗期是补水的的核心关键期,而西瓜膨大后期的补水对西瓜产

量没有明显的影响。从试验结果来看,在补水次数为5次、补水定额为 $90\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 的情况下,苗期缺水比西瓜膨大后期缺水减产52%,同样,在膨大后期都缺水,且补水次数为4次,补水定额为 $90\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 的情况下,处理3和处理14相比,处理3膨大中期缺水,处理14苗期缺水,西瓜苗期缺水、西瓜膨大中期缺水减产61%,从处理15和处理16可以看出在其它时期灌水相同时,膨大初期多灌一水产量提高46%,说明膨大初期灌水尤为重要。

由此得出结论:西瓜需水的关键阶段为苗期>开花坐果期>膨大初期>膨大中期>伸蔓期>膨大后期。

对图1结果进行统计分析,结果如表3所示。

表 3 西瓜产量统计分析

Table 3 Statistical analysis of watermelon yields

平均 Average	标准误差 Standard error	中位数 Median	众数 Mode	标准差 Standard deviation	方差 Variance	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness
7068.61	696.08	6278.70	—	2784.33	7752479	1.3687	1.1133
区域 Area	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	求和 Summation	观测数 Observed number	最大(1) Maximum(1)	最小(1) Minimum(1)	置信度(95.0%) Confidence coefficient
10901.4	3090.2	13991.6	113097.8	16	13991.6	3090.2	1483.663

从表 3 的统计分析结果看出,该试验设计条件下,峰度和偏度都大于 0,分别为 1.3687 和 1.1133,这说明数据起伏变化和正态分布相比较平缓,峰值偏移发生在均质左侧。

2.3 压砂地西瓜 Jensen 模型的建立

水分生产函数一般用三种指标表示:灌水量(W),实际腾发(蒸发蒸腾)量(ET_a),土壤含水量(θ_a)。表示因变量产量的指标也有三种指标:单位面积产量(Y),平均产量($K = Y/W$),边际产量($y = dy/dw$)^[5]。

作物水分生产函数的数学模型多种多样,概括起来有静态模型和动态模型^[5]。本研究选用静态 Jensen 模型^[22],表达式如下。

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_i^{\lambda_i} \quad (2)$$

式中, Y_a 为作物实际产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_m 为作物最大产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET_m 作物最大腾发量(mm); ET_a 为实际腾发(蒸发蒸腾)量(mm); λ_i 为作物不同阶段缺水对产量的敏感指数(幂指数型), $i = 1, 2, \dots, n$, 生育阶段划分序号。

利用试验结果和水分生产函数中的乘法模型(Jensen 模型)建立了压砂地西瓜水分生产函数,如式(3)所示。

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \left(\frac{ET_{a(1)}}{ET_{m(1)}} \right)^{0.6171} \left(\frac{ET_{a(2)}}{ET_{m(2)}} \right)^{0.2708} \left(\frac{ET_{a(3)}}{ET_{m(3)}} \right)^{0.0355} \left(\frac{ET_{a(4)}}{ET_{m(4)}} \right)^{0.1097} \left(\frac{ET_{a(5)}}{ET_{m(5)}} \right)^{0.1390} \left(\frac{ET_{a(6)}}{ET_{m(6)}} \right)^{0.1106} \quad (3)$$

从式(3)可知压砂地西瓜各生育阶段的水分敏感系数 $\lambda_1 = 0.6171$, $\lambda_2 = 0.2707$, $\lambda_3 = 0.0355$, $\lambda_4 = 0.1097$, $\lambda_5 = 0.1390$, $\lambda_6 = 0.1106$ 。

可见苗期缺水对压砂地西瓜产量影响最大。之所以计算出苗期水分敏感系数大是因为压砂地西瓜有其特殊性,因为压砂地西瓜种植地区昼夜温差大,种植初期日平均温度低,从播种到伸蔓持续时间较长,从 5 月上旬到 6 月上旬持续 30 多天,占到西瓜整个生育期的 1/3,该时段当地的平均日平均气温

为 16.6℃,夜间最低 8.3℃,然而白天最高温度并不低,达到 24.3℃,这样造成的结果就是白天蒸腾蒸发量大,而夜间温度及平均温度低,西瓜生长发育积温小,生长发育就慢,那么就造成了作物蒸发蒸腾量大,则计算出的水分敏感系数也大。

同时,由于苗期是压砂地西瓜生产的基础,壮苗是丰产的基础,如果缺水会对叶芽和花芽分化影响较大,从而对产量造成影响^[21],与郑健研究的小型西瓜亏缺灌溉结果相一致^[23]。

伸蔓期缺水对压砂地西瓜产量的影响较之苗期有所减小,但比其它生育阶段缺水影响较大,这是因为伸蔓期是压砂地西瓜同化器官和吸收器官急剧增长的时期,生殖器官初步形成,是奠定生殖发育的基础,所以这个阶段缺水会对产量造成影响。由于开花坐果期持续时间较短,一般持续时间为 4~6 d,在很短的时间内即使西瓜受旱,也不会对最终产量造成严重的影响,这与实际生产中宁夏中部干旱带压砂地西瓜一定程度的受旱对产量不会造成影响是一致的,所以水分敏感系数较小,当西瓜开始进入膨大期以后水分对产量的影响明显增强,所以西瓜膨大期保证水分对西瓜产量有重要的意义。

3 压砂地西瓜灌溉制度优化

3.1 压砂地西瓜灌溉制度优化模型

对于压砂地西瓜灌溉制度的优化,首先要明确第 i 阶段初计划湿润层内可供作物利用的土壤储水量 W_i (mm) 和西瓜各生育阶段三基点土壤含水率。

土壤储水量 W_i 可用式(4)进行计算,即:

$$W_i = 10 \gamma H_i (\bar{\theta} - \theta_w) \quad (4)$$

式中, γ 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H_i 为 i 阶段计划湿润层深(m); $\bar{\theta}$ 为 i 阶段计划湿润层平均土壤含水率; θ_w 为凋萎系数。

据 Dimilrov 在保加利亚南部褐色森林土试验,西瓜生长的土壤含水率为田间持水量的 60%~80%时最经济,不同生育期有所不同,苗期为 65%,伸蔓期 70%,而果实膨大期为 75%。压砂地西瓜播

种的是已经催芽的种子,所以没有发芽的过程,那么出苗期土壤体积含水率在 10% 以上时都能够保证

正常出苗^[21]。西瓜各生育阶段三基点土壤含水率如表 4 所示。

表 4 西瓜各个生育阶段三基点土壤水分(质量含水率%)

Table 4 The soil moisture content of watermelon for three basic points in each growth stage

生育阶段 Development stages	萎蔫系数 Wilting coefficient	最适宜含水率 Optimum moisture content	上限水分 Upper limited moisture
出苗期 Sprout	4.4	10.2	23.6
幼苗期 Seedling stage	5.8	16.8	23.6
伸蔓期 Stretch tendril stage	7.2	18.2	23.6
开花坐果期 Flowering and fruit stage	7.2	18.4	23.6
膨果期 Expand stage	7.2	19.7	23.6
成熟期 Maturation stage	5.9	13.1	18.4

作物灌溉制度最优是一个多阶段决策过程,用动态规划模型描述如下^[24]:

(1) 田间水量平衡方程

根据当地实际情况,压砂地西瓜田间水量平衡方程表示为式(5)所示的形式:

$$W_{i+1} - W_i = P_i + M_i - ET_{ai} \quad (5)$$

式中, W_i , W_{i+1} 为第 i 阶段始末土壤计划湿润层内的储水量(mm); ET_{ai} 为第 i 阶段实际腾发量(mm); P_i 为有效降水量(mm); K_i 为地下水补给量(mm); M_i 为灌溉水量(mm)。

(2) 水量分配方程

$$q_{i+1} = q_i - m_i \quad (6)$$

式中, q_i , q_{i+1} 分别为第 i , 第 $i+1$ 阶段的可供水量; m_i 为第 i 阶段的灌水定额。

可分配水量一定情况下,采用 Jensen 模型,以单位面积产量最大为目标函数,即 $Y_a/Y_m \rightarrow 1.0$, 即:

$$F = \max\left(\frac{Y_a}{Y_m}\right) = \max \prod_i^n \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}}\right)^{\lambda_i} \quad (7)$$

式中, ET_{mi} 为第 i 阶段的潜在腾发量(mm)。

3.2 压砂地西瓜灌溉制度优化

由以上计算结果可知,虽然苗期水分敏感系数大,这是因为苗期持续时间长,而且还包含了圆棵期,但是苗期压砂地西瓜土壤适宜含水率要求相对

较低,仅为田间持水率的 65%,这就说明苗期缺水造成对产量的影响不等同于苗期需水量大,那么在压砂地灌溉制度优化时,要将需水关键期保证土壤水分和需水量综合考虑,才能做到合理地进行灌溉制度优化。

作物水分敏感系数是说明该阶段缺水对产量造成的影响,但并不代表该阶段的需水量就大,本研究根据计算结果来看,各阶段压砂地西瓜日耗水量如表 5 所示,所以对于灌溉制度的优化要结合作物水分敏感系数和作物日需水量进行计算。

根据以上提出的模型及解法,结合表 5 的压砂地西瓜灌溉制度设计基本参数,在考虑压砂地西瓜需水关键期的基础上,用 Excel 程序进行编程计算,得到如表 6 所示的压砂地西瓜覆膜干旱年条件下的优化灌溉制度。

从表 6 看出,压砂地西瓜产量随着供水量的增大而明显增加。供水量为 80 mm 时,在初始含水率为田间持水率 65%、75% 和 85% 时,产量为充分灌溉的 41% ~ 45%; 供水量为 160 mm 时,产量为充分灌溉的 63.4% ~ 63.7%; 供水量为 240 mm 时,在初始含水率为田间持水率 65%、75% 和 85% 时,产量为充分灌溉的 86.5% ~ 88.9%; 供水量为 320 mm 时,在初始含水率为田间持水率 65%、75% 和 85%

表 5 压砂地西瓜灌溉制度设计基本参数

Table 5 The basic parameter of design irrigation schedule of watermelon in gravel mulchfield

生育阶段 Development stages	出苗期 Sprout	伸蔓期 Stretch tendril stage	开花坐果期 Blossom and fruit stage	膨大初期 Expand initial stage	膨大中期 Expand interim stage	膨大后期 Expand late stage
充分灌溉 ET_m Full irrigation/mm	66	70.07	46.71	72.23	89.19	65.71
水分敏感指数 Water sensitive index	0.6171	0.2708	0.0355	0.1097	0.139	0.1106
干旱年有效降雨 P_i /mm ^[25]	5.9	5.4	3.0	5.1	5.1	11.0
阶段日需水量/mm	1.89	2.06	4.67	7.22	8.92	6.57

表6 压砂地西瓜覆膜干旱条件下的灌溉制度优化^[14]

Table 6 Optimized irrigation schedule of watermelon in gravel mulch field with plastic film mulch in drought years

(θ_0/θ_f) /%	W_0 /mm	供水量 Irrigation depth /mm	阶段灌水量 Period irrigation depth/mm					相对产量 Relative yield Y_a/Y_m	
			出苗期 Sprout	伸蔓期 Stretch tendrill stage	开花坐果 Blossom and fruit stage	膨大初期 Expand initial stage	膨大中期 Expand interim stage		膨大后期 Expand late stage
65	42.7	80	15	20	15	20	10	0	0.4098
		160	20	30	25	35	30	20	0.6335
		240	25	50	30	50	50	35	0.8652
		320	30	55	45	70	60	60	1.0384
75	49.3	80	10	20	15	25	10	0	0.4245
		160	15	35	20	40	30	20	0.6699
		240	20	45	35	55	50	35	0.8671
		320	25	50	40	70	70	65	1.0514
85	55.9	80	5	20	15	20	20	0	0.4534
		160	10	30	20	30	30	20	0.6377
		240	15	45	35	55	50	40	0.8885
		320	20	50	45	70	70	65	1.0685

注:该供水量是在局部灌溉条件下所设计的供水量。 Note: This amount of water supply was designed under localized irrigation.

时,产量为充分灌溉的 104% ~ 107%。可见,随着供水量的增加增产效果越来越不明显,增产效果最明显的供水量范围为 80 ~ 240 mm 之间,但是供水量达到 320 mm 时,可达到最为理想的产量,所以,在局部灌溉条件下,压砂地西瓜补水量为 320 mm 可以达到高产。

4 结 论

1) 通过试验研究,分析了压砂地西瓜不同阶段的耗水规律:随着补灌量的不同作物耗水量有所差异,补灌量越大,作物耗水量越大。

2) 在压砂地西瓜整个生育期,西瓜从进入伸蔓期以后耗水量明显增大,至膨大期耗水量达到最大,当西瓜开始成熟以后,作物耗水量有所减少。

3) 压砂地西瓜不同生育阶段水分亏缺对压砂地西瓜产量的影响顺序为:苗期 > 开花坐果期 > 膨大初期 > 膨大中期 > 伸蔓期 > 膨大后期。

4) 利用 Jensen 模型建立了压砂地西瓜水分生产函数,并且得到了各阶段作物水分敏感指数: $\lambda_1 = 0.6171$, $\lambda_2 = 0.2707$, $\lambda_3 = 0.0355$, $\lambda_4 = 0.1097$, $\lambda_5 = 0.1390$, $\lambda_6 = 0.1106$ 。

5) 通过灌溉制度优化发现:随着供水量的增加增产效果越来越不明显,供水量范围为 80 ~ 240 mm 之间时增产效果最明显,供水量达到 320 mm 时,压砂地西瓜可获得高产。最优灌溉制度为:苗期灌水 20 ~ 30 mm,伸蔓期灌水 50 ~ 55 mm,开花坐果期灌

水 40 ~ 45 mm,膨大初期灌水 70 mm,膨大中期灌水 60 ~ 70 mm,膨大末期灌水 60 ~ 65 mm。

参 考 文 献:

- [1] 王 芳,李友宏,赵天成,等.关于宁夏压砂西(甜)瓜持续发展的思考[J].宁夏农林科技,2005,(5):60-61.
- [2] 杨来胜,席正英,李 玲,等.砂田的发展及其应用研究(综述)[J].甘肃农业,2005,7(228):72.
- [3] Modaihsh A S, Horton R, Kirkham D. Soil water evaporation suppression by sand mulches[J]. Soil Science, 1985,139:357-361.
- [4] 王亚军,谢忠奎,张志山,等.甘肃砂田西瓜覆膜补灌效应研究[J].中国沙漠,2003,23(3)300-305.
- [5] 罗金耀.节水灌溉理论与技术[M].武汉:武汉大学出版社,2003.
- [6] 刘增进,李宝萍,李远华,等.冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J].农业工程学报,2004,20(4):58-62.
- [7] 张 兵,袁寿其,李 红.基于遗传算法求解的冬小麦优化灌溉产量模型研究[J].农业工程学报,2006,22(8):12-15.
- [8] 郑建华,黄冠华,黄权中,等.干旱区膜下滴灌条件下洋葱水分生产函数有优化灌溉制度[J].农业工程学报,2011,27(8):25-30.
- [9] 宋朝红,崔远来,罗 强.基于遗传算法的非充分灌溉下最优灌溉制度设计[J].灌溉排水学报,2005,24(6):45-48.
- [10] 段春青,邱 林,陈晓楠,等.混沌算法在节水灌溉制度优化设计中的应用[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(9):133-136.
- [11] 李晓玲,张 芮,丁 林.地面灌溉条件下蚕豆的水分生产函数与灌溉定额的确定[J].甘肃农业大学学报,2006,41(4):91-94.

- 间养分竞争机理分析[J].水土保持研究,2000,7(3):219-221, 252.
- [12] 高国治,王明珠,张斌.低丘红壤南酸枣-花生复合系统物种间水肥光竞争的研究Ⅱ.南酸枣与花生利用光能分析[J].中国生态农业学报,2004,(2):92-94.
- [13] Moreno G, Obrador J J, Garcia A. Impact of evergreen oaks on soil fertility and crop production in intercropped dehesas[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 119(3):270-280.
- [14] 云雷,毕华兴,马雯静,等.晋西黄土区林草复合系统刺槐根系分布特征[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):151-155.
- [15] 马秀玲,陆光明,徐兆龄,等.农林复合系统中林带和作物的根系分布特征[J].中国农业大学学报,1997,2(1):109-116.
- [16] 张劲松,孟平.果农复合系统中果树根系空间分布特征[J].林业科学,2002,38(4):30-33.
- [17] 张永清.几种谷类作物根土系统的研究[D].太谷:山西农业大学,2005:8-9.
- [18] 马长明,翟明普,刘春鹏.单作与间作条件下核桃根系分布特征研究[J].北京林业大学学报,2009,31(6):181-186.
- [19] 云雷,毕华兴,马雯静,等.晋西黄土区核桃花生复合系统核桃根系空间分布特征[J].东北林业大学学报,2010,38(7):67-70.
- [20] 彭晓邦,张硕新.商洛低山丘陵区核桃-黄芩农林复合系统中植物根系分布特征[J].西北农业学报,2013,22(9):171-177.
- [21] 何春霞,孟平,张劲松,等.华北低丘山区核桃-决明子复合模式的根系分布[J].林业科学研究,2013,26(6):715-721.
- [22] 葛晓改,肖文发,曾立雄,等.不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系[J].生态学报,2012,32(3):852-862.
- [23] 石培礼,李文华.生态交错带的定量判定[J].生态学报,2002,22(4):586-592.
- [24] Stohlgren T J, Bachand R R. Lodgepole pine (*Pinus contorta*) ecotones in rocky mountain national park, colorado, USA[J]. Ecology, 1997, 78(2):632-641.
- [25] 许华森,云雷,毕华兴,等.刺槐+苜蓿复合系统土壤养分分布特征及边界影响域——以晋西黄土区为例[J].中国水土保持科学,2011,9(5):48-53.
- [26] Fortin M. Edge detection algorithms for two-dimensional ecological data[J]. Ecology, 1994, 75(4):956-965.
- [27] Choesin D, Boerner R E J. Vegetation boundary detection: a comparison of two approaches applied to field data[J]. Plant Ecology, 2002, 158(1):85-96.
- [28] 李丽光,何兴元,李秀珍,等.岷江上游花椒地/林地边界土壤水分影响域的定量判定[J].应用生态学报,2007,17(11):2011-2015.
- [29] 王晓,张克斌,杨晓晖,等.半干旱区湿地-干草原交错带边界判定及其变化[J].生态学报,2012,32(16):5121-5127.
- [30] 石培礼,刘兴良.游动分割窗技术在生态交错带定量判定中的应用——以四川巴郎山岷江冷杉林线为例[J].植物生态学报,2002,26(2):189-194.
- [31] 高路博,毕华兴,许华森,等.晋西幼龄苹果×大豆间作的土壤中水分、养分空间分布特征及对大豆的影响[J].中国农学通报,2013,29(24):36-42.

(上接第129页)

- [12] 罗遵兰,冯绍元,左海萍.山西省冬小麦水分生产函数模型初步分析[J].灌溉排水学报,2005,24(1):16-19.
- [13] 张忠学,郭亚芬,王柏,等.黑龙江省西部半干旱区大豆水分生产函数试验研究[J].灌溉排水学报,2008,27(3):49-51.
- [14] 韩松俊,王静,刘群昌,等.三种作物水分生产函数模型的适用性比较[J].灌溉排水学报,2009,28(4):10-13.
- [15] Ferreira T C, Goncalves D A. Crop - yield/water - use production functions of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) grown under differential nitrogen and irrigation treatments in a hot, dry climate[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90:45-55.
- [16] Tong Fangfang, Guo Ping. Simulation and optimization for crop water allocation based on crop water production functions and climate factor under uncertainty[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37: 7708-7716.
- [17] Ma Ying, Feng Shaoyuan, Song Xianfang. A root zone model for estimating soil water balance and crop yield responses to deficit irrigation in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2013, 127:13-24.
- [18] Henry E I, Andrew K P R T, Baanda A S, et al. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94:1-10.
- [19] Kelly Brumelow, Aris Georgakakos. Determining crop-water production functions using yield irrigation gradient algorithms[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87:151-161.
- [20] Mukherjee A, Sarkar S, Chakraborty P K. Marginal analysis of water productivity function of tomato crop grown under different irrigation regimes and mulch managements[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104:121-127.
- [21] 中国农业科学院郑州果树研究所,中国园艺学会西甜瓜专业委员会,中国园艺协会西甜瓜协会.中国西瓜甜瓜.北京:中国农业出版社,2000.
- [22] 田军仓.干旱地区节水灌溉与扬水灌区灌溉调配智能决策支持系统研究[M].银川:宁夏人民出版社,2002.
- [23] 郑健,蔡焕杰,陈新明,等.调亏灌溉对温室小型西瓜水分利用效率及品质的影响[J].核农学报,2009,23(1):159-164.
- [24] 史海滨,田军仓,刘庆华.灌溉排水工程学[M].北京:中国水利水电出版社,64-66.